

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Duarte Jorge Brito Antunes Guimarães

Cavidades Moldantes Produzidas por Estereolitografia

Tese de Mestrado
Projecto e fabrico de Moldes

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor António José Vilela Pontes

Setembro 2006

Agradecimentos

Não teria sido possível a realização deste trabalho sem o apoio e ajuda de várias pessoas, instituições e empresas. Queria expressar os meus agradecimentos e identificar aqueles cujos contributos foram mais importantes.

Professor António José Vilela Pontes, pela paciência, confiança, orientação e pelos conhecimentos transmitidos.

Departamento de Engenharia de Polímeros (DEP) da Universidade do Minho (UM) pelos meios e equipamentos fornecidos para este trabalho.

Empresa SolidTech, pela construção dos insertos em SL.

Empresa João Pontes e Irmãos, pela construção dos postigos em alumínio.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

Resumo

Os processos de prototipagem rápida (RP-Rapid Prototyping) têm permitido a introdução de peças mais rapidamente no mercado e o fabrico de protótipos ou de pequenas séries com custos reduzidos. As ferramentas de prototipagem rápida (RP) surgiram no final dos anos 80 e permitem construir modelos 3D muito rapidamente. A Estereolitografia (SL) foi patenteada em 1986 pela empresa 3D Systems, sendo o processo de prototipagem rápida mais utilizado.

Devido à sua boa precisão, a estereolitografia tem sido bastante utilizada no fabrico de protótipos funcionais e no fabrico indirecto de ferramentas.

Quanto à utilização da estereolitografia directamente em moldes de injeção, este não tem sido muito utilizado. A sua durabilidade é inferior à dos moldes metálicos e o seu custo é elevado. A baixa condutibilidade térmica destes moldes implica ciclos muito longos. A diminuição da resistência mecânica com o aumento da temperatura pode conduzir à deterioração e mesmo à destruição do molde. Aspectos construtivos como a geometria das peças, ângulos de saída e formas do ataque, que no caso dos moldes de aço são conhecidas, nestes moldes assumem uma muito maior importância.

Apesar de existirem trabalhos nesta área, estes não são conclusivos quanto à durabilidade dos moldes em função do material, da geometria e dos parâmetros de injeção. Para evitar a falha dos moldes de estereolitografia logo nas primeiras injeções e prolongar a sua vida útil, é necessário uma boa compreensão do comportamento destes moldes. Os métodos de previsão podem reduzir o risco de falha destes moldes, no entanto, a sua utilização necessita de validação experimental.

Neste trabalho foram construídos postigos em alumínio e inseridos num molde já existente. Nestes postigos, existem caixas para alojar postigos mais pequenos fabricados por estereolitografia. Foram construídos postigos por estereolitografia para 3 diferentes geometrias. Foram injectadas peças em 2 materiais diferentes e as temperaturas durante o processo foram monitorizadas, para poderem ser comparadas com os valores obtidos pelas simulações utilizando o software Algor.

Moulding Cavities made by Stereolithography

Abstract

Rapid Prototyping processes have allowed the rapid introduction of parts in the market and the production of prototypes or small series with reduced costs. Rapid Prototyping tools was introduced in the end of the 80s and made possible to build 3D models in a very short period of time. Stereolithography patent was registered in 1986 by the company 3D, being the most used Rapid Prototyping process.

Due to its accurate precision, Stereolithography has been widely used to manufacture functional prototypes as well as in the indirect production of tools. On the other hand Stereolithography has not been used directly in direct tooling of injection moulds because its durability is inferior to the metallic moulds and costs are higher. The low thermal conductivity of these moulds implies longer cycles. The decrease of the mechanical resistance with increase of the temperature may lead to the mould deterioration or even to its destruction. Designing aspects such as parts geometry, draft angles and gates, which in steel moulds are widely known, assume in this kind of moulds a bigger importance.

Although there are several studies on this area, they are not conclusive in aspects like moulds durability in the light of material, geometry and injection parameters. To avoid the malfunction of a Stereolithography moulds in the first mouldings and to extend its useful life, it is necessary a deeper study of these moulds behaviour. Simulation methods may reduce the failure risk, however, its use needs experimental validation.

To carry out this study, aluminium inserts were built to be inserted in an already existent mould. These inserts have housings to accommodate smaller inserts manufactured using Stereolithography method. Stereolithography inserts were built in three different geometries. Two different materials were use in the injection moulding production and the temperatures were monitored during the whole process and compared with values obtained by simulation in software Algor.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas	xv
1 Introdução	1
1.1 Objectivos	1
1.2 Organização da dissertação	2
2 Estado da arte	3
2.1 Prototipagem Rápida	3
2.2 Processo integrado de fabrico	4
2.2.1 Protótipo Digital (Digital Prototype)	5
2.2.2 Protótipo Virtual (Virtual Prototype)	5
2.2.3 Protótipo Físico (Physical Prototype)	5
2.2.4 Fabrico Rápido de Ferramentas (Rapid Tooling)	6
2.2.4.1 Ferramentas SL Indirecto	7
2.2.4.2 Utilização directa de ferramentas de SL	7
2.3 Estereolitografia	7
2.3.1 Processo de Estereolitografia	8
2.3.2 Equipamentos	21
2.3.3 Materiais para Estereolitografia	22
2.3.4 Potencialidades da Estereolitografia	23
2.3.5 Outros Equipamentos	25
2.3.5.1 Máquina com plataforma Rotativa	25
2.3.5.2 Estereolitografia com luz UV convencional	26
2.3.5.3 Estereolitografia para grandes dimensões	27
2.3.6 Novas Resinas	27
2.3.6.1 Resinas reforçadas com fibras	28
2.3.6.2 Resinas com materiais cerâmicos	29
2.3.6.3 Resinas elastómeros	30
2.3.6.4 Resinas resistentes ao fogo	30
2.3.6.5 Resinas resistentes à temperatura	30
2.3.6.6 Resinas compósitas	31
2.4 Utilização de insertos sólidos – ACES (Accurate Clear Epoxy Solid)	32
2.4.1 Insertos com canal de refrigeração incorporado	32
2.4.2 Insertos sólidos com canal de refrigeração incorporado auto pressurizados	33
2.5 Direct AIM	34
2.5.1 Espessura da casca	35
2.5.2 Material de enchimento	35
2.5.3 Geometria	35
2.5.4 Injecção	36
2.5.5 Pressão	37
2.5.6 Arrefecimento	38
2.5.7 Força de extracção	38
2.5.8 Insertos com canais de fluxo de calor	41
3 Trabalho Experimental	43
3.1 Peças a produzir	43
3.2 Material das moldações	44
3.3 Construção dos postigos de alumínio	45

3.4	Construção dos postigos de estereolitografia.....	47
3.5	Instrumentação	50
3.6	Material de enchimento	53
3.7	Simulações de fluxo (Moldflow).....	55
3.7.1	Modelo de elementos finitos	55
3.7.1.1	Peça “Placa rectangular”	56
3.7.1.2	Peça “Ficha eléctrica”	58
3.7.1.3	Peça “Engate plástico macho”	60
3.8	Simulações térmicas utilizando o software Algor	62
3.9	Produção das Moldações	66
3.9.1	Peça “Placa”	66
3.9.2	Peça “Ficha eléctrica”	67
3.9.3	Peça “Engate plástico”	68
4	Resultados.....	69
4.1	Simulações de fluxo	69
4.1.1	Temperatura média no final do enchimento	69
4.1.2	Temperatura do circuito de água	71
4.1.3	Tempo para solidificação	73
4.1.4	Campo de pressões no fim do enchimento	75
4.1.5	Contração volumétrica.....	76
4.2	Injecção das peças	78
4.2.1	Peça “Placa”	78
4.2.1.1	Postigos maciços.....	78
4.2.1.2	Postigos com 2mm de casca	79
4.2.1.3	Postigos com 3mm de casca	81
4.2.1.4	Desempenho térmico	82
4.2.2	Peça “Ficha eléctrica”.....	87
4.2.2.1	Desempenho térmico	87
4.2.2.2	Comparação experimental / simulação.....	91
4.2.3	Peça “Engate plástico”	97
4.2.3.1	Desempenho térmico (Registo das Temperaturas).....	97
4.2.3.2	Comparação experimental / simulação.....	104
5	Conclusão	112
5.1	Utilização de técnicas computacionais	112
5.2	Projecto e construção das cavidades moldantes em estereolitografia	113
5.3	Utilização e durabilidade dos moldes de estereolitografia	113
6	Sugestões para Trabalhos Futuros	115
7	Referências	116
8	Anexos	120

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Arquitectura de um processo integrado de fabrico [3].....	4
Figura 2.2 – Tipos de digitalização [9].....	5
Figura 2.3 – Principais componentes da máquina de estereolitografia [8].....	8
Figura 2.4 – Etapas do processo de Estereolitografia adaptado de [9].....	8
Figura 2.5 – Normais aos triângulos.....	9
Figura 2.6 – Normais aos triângulos [10].....	9
Figura 2.7 – Exemplos de ficheiros STL [11]	9
Figura 2.8 – Erro de convexidade e concavidade [12]	10
Figura 2.9 – Máximas dimensões de geometrias que não necessitam de suportes [2]...	11
Figura 2.10 – Tempo de construção em função da espessura de camada (1mils=0.001”) [2]	12
Figura 2.11 – Várias orientações para a construção [13]	13
Figura 2.12 – Secção de linhas polimerizadas [2].....	13
Figura 2.13 – Compensação da largura da linha (linewidth) Esq.-desligado Dir.- ligado [2].....	14
Figura 2.14 – Fases da construção.....	15
Figura 2.15 – Comparação entre WEAVE e o STAR-WEAVE [2].....	16
Figura 2.16 – Retracted hatch [2]	17
Figura 2.17 – Dilatação da resina XB 5081 com a exposição a diversos solventes [2].....	18
Figura 2.18– Eficiência volumétrica em função do comprimento de onda [2]	19
Figura 2.19 – Tempo de cura em função da massa [2].....	19
Figura 2.20 – Modelo utilizado em [14].....	20
Figura 2.21 – Máquinas da 3DSystems [15]	21
Figura 2.22 – Máquinas da Sony [16]	21
Figura 2.23 – Máquina Fockeleund & Schwarze [17].....	21
Figura 2.24 – Máquinas da CMET [18]	21
Figura 2.25 – Anel [19]	22
Figura 2.26 – MEIKO CV-810 [19]	22
Figura 2.27 – MEIKO LC-510 [19].....	22
Figura 2.28 – MEIKO LCV-700 [19].....	22
Figura 2.29 – Máquina de Micro Estereolitografia da EPFL [20].....	22
Figura 2.30 – Peça de Micro Estereolitografia [20]	22
Figura 2.31 – Peça de Micro Estereolitografia [21]	22
Figura 2.32 – Peça para deslizamento vertical e de torção para secção circular [22]	23
Figura 2.33 – Deslizamento secção prismática [22].....	23
Figura 2.34 – Sombra do laser [22]	24
Figura 2.35 – Espalhamento da resina [22]	24
Figura 2.36 – Suportes na construção da cavidade [22]	24
Figura 2.37 – Folgas para colocação dos inserts [22].....	24
Figura 2.38 – Peça de estereolitografia com inserto metálico roscado da Design Prototyping Technologies [23]	25
Figura 2.39 – Plataforma com rotação em x e y e com movimento linear em z [24].....	26
Figura 2.40 – Solução construtiva [24]	26
Figura 2.41 – Máquina Compact Prototyping System (CPS) [25].....	26
Figura 2.42 – Esquema de funcionamento da CPS [25].....	26

Figura 2.43 – Construção na máquina Materialise Mammoth após 24 horas (esq.) e após 86h (dir.) [26]	27
Figura 2.44 – Estátua de Kouros [26]	27
Figura 2.45 – Variação da tensão de rotura com % de fibras [27]	28
Figura 2.46 – Variação do alongamento com % de fibras [27]	28
Figura 2.47 – Contracção longitudinal (L) e transversal (T) em resinas sem reforço com espessuras de camada de 150 e 300 μ m [27]	28
Figura 2.48 – Contracção longitudinal (L) e transversal (T) em resinas com reforço com espessuras de camada de 150 e 300 μ m [27]	28
Figura 2.49 – Viscosidade ($\dot{\gamma} = 100\text{s}^{-1}$, 20°C) da suspensão de alumina (80 % em peso) para diferentes concentrações de dispersante [28]	29
Figura 2.50 – Viscosidade ($\dot{\gamma} = 100\text{s}^{-1}$, 20°C) da suspensão de alumina (80 % em peso) em relação à temperatura para diferentes concentrações de diluente na resina 0 (□), 20 (O) e 30 wt% (x) [28]	29
Figura 2.51 – Peça fabricada com resina SOMOS ULM 17220	30
Figura 2.52 – Resina Somos FR 16120	30
Figura 2.53 – Peça fabricada com resina Somos 12120	30
Figura 2.54 – Peça fabricada com resina Somos Prototool 20L	31
Figura 2.55 – Peça da Renault F1 Team fabricada com Accura Bluestone	31
Figura 2.56 – Peça em resina SOMOS NanoForm 15120	31
Figura 2.57 – Representação esquemática de um inserto conformal cooling [30]	32
Figura 2.58 – Inserto conformal cooling [31]	33
Figura 2.59 – Conjunto porta moldes, válvulas para controlo de fluxo de fluido refrigerante, mangueira, manómetros e insertos [31]	34
Figura 2.60 – Cascas de direct AIM preenchidas com resina e pós de alumínio [32] ...	34
Figura 2.61 – Peça de teste adaptada de [33]	36
Figura 2.62 – N° de peças em função do ângulo de saída dos entalhes para um ataque em lâmina (fan gate) e ponto (pin gate) adaptado de [33]	36
Figura 2.63 – Rompimento de geometrias durante a injeção	36
Figura 2.64 – Razão entre a largura e espessura e entre a altura e espessura [35]	37
Figura 2.65 – Efeito de degrau [2]	38
Figura 2.66 – Rugosidade em função do ângulo e da espessura da camada [36]	38
Figura 2.67 – Força de extracção em função do ângulo de saída para uma espessura de 51 μ m [36]	39
Figura 2.68 – Força de extracção em função do ângulo de saída para uma espessura de 203 μ m [36]	39
Figura 2.69 – Força de extracção em função do tempo de arrefecimento em insertos com e sem tratamento térmico [37]	39
Figura 2.70 – Peça utilizada por Hopkinson em [5]	40
Figura 2.71 – Força de extracção em função do tempo de arrefecimento [5]	40
Figura 2.72 – Força de extracção com o n° de ciclos [37]	40
Figura 2.73 – Esquema de canais de fluxo de calor [30]	41
Figura 2.74 – Postiços com canais de fluxo de calor [38]	41
Figura 3.1 – Peça “Placa rectangular” com alimentação	43
Figura 3.2 – Peça “Ficha Eléctrica”	44
Figura 3.3 – Peça “Engate Plástico Macho”	44
Figura 3.4 – Postiço em alumínio – extracção	45
Figura 3.5 – Postiço em alumínio – injeção	45
Figura 3.6 – Modificações no postiço de alumínio	46
Figura 3.7 – Extracção da “Placa”	46

Figura 3.8 – Extracção da “Ficha”	47
Figura 3.9 – Extracção do “Engate”	47
Figura 3.10 – Abertura de canal de alimentação no postigo Alumínio	47
Figura 3.11 – Postigo SL “placa”	48
Figura 3.12 – Postigo lado da extracção	48
Figura 3.13 – Dimensões do alojamento	48
Figura 3.14 – Postigo SL “engate plástico”	49
Figura 3.15 – Postigo SL maciço	49
Figura 3.16 – Postigo SL casca	49
Figura 3.17 – Postigo SL “placa” em forma de casca	49
Figura 3.18 – Efeito degrau no postigo SL “ficha”	50
Figura 3.19 – Efeito degrau no postigo SL “engate plástico”	50
Figura 3.20 – Termopar tipo K OMEGA	51
Figura 3.21 – Termopar tipo K PICO	51
Figura 3.22 – Abertura de furo e rasgo para colocar os termopares	51
Figura 3.23 – Disposição dos termopares “ficha” vista traseira do postigo de SL	52
Figura 3.24 – Disposição dos termopares “ficha” vista de frente	52
Figura 3.25 – Disposição dos termopares “engate plástico” vista traseira do postigo de SL	52
Figura 3.26 – Disposição dos termopares “engate plástico” vista frente	52
Figura 3.27 – Leitor OMEGA HH506RA	53
Figura 3.28 – Leitor de temperaturas Pico TC-08	53
Figura 3.29 – Resina Metalceys	53
Figura 3.30 – Resina Devcon Aluminium Liquid (F-2) Epoxy	53
Figura 3.31 – Superfície do enchimento irregular	54
Figura 3.32 – Montagem para enchimento	54
Figura 3.33 – Enchimento obtido com a montagem anterior	54
Figura 3.34 – Superfícies de definição da peça	56
Figura 3.35 – Modelo de elementos finitos	56
Figura 3.36 – Resultado gráfico da orientação da malha	56
Figura 3.37 – Visualização em Rhinoceros 3D	56
Figura 3.38 – Superfície de definição da peça só com lado esquerdo	57
Figura 3.39 – Resultado gráfico de arestas livres	57
Figura 3.40 – Modelo de elementos do molde “placa”	58
Figura 3.41 – Superfícies de definição da peça “ficha”	58
Figura 3.42 – Modelo de elementos finitos “ficha”	58
Figura 3.43 – Resultado gráfico de distorção antes da correcção	59
Figura 3.44 – Modelo de elementos do molde “ficha”	59
Figura 3.45 – Superfícies de definição da peça “engate plástico”	60
Figura 3.46 – Modelo de elementos finitos “engate plástico”	60
Figura 3.47 – Arestas livres	60
Figura 3.48 – Intersecções	61
Figura 3.49 – Distorção	61
Figura 3.50 – Modelo de elementos finitos do molde “engate plástico”	62
Figura 3.51 – Montagem para Algor da “placa” Esquerda – Montagem completa Direita – Vista em corte	63
Figura 3.52 – Montagem para Algor da “ficha”	63
Figura 3.53 – Montagem para Algor do “engate plástico”	63
Figura 3.54 – Geração da malha na “placa”	63
Figura 3.55 – Geração da malha “ficha”	64
Figura 3.56 – Geração da malha “engate plástico”	64

Figura 3.57 – Colocação manual do termopar.....	67
Figura 4.1 – Temperatura média “Placa”	70
Figura 4.2 – Temperatura média “Ficha”	70
Figura 4.3 – Temperatura média “Engate plástico”	71
Figura 4.4 – Temperatura do circuito de água “Placa”	71
Figura 4.5 – Temperatura do circuito de água “Ficha”	72
Figura 4.6 – Temperatura do circuito de água “Engate plástico”	72
Figura 4.7 – Tempo de solidificação “Placa”	73
Figura 4.8 – Tempo de solidificação “Ficha”	74
Figura 4.9 – Tempo de solidificação “Engate plástico”	74
Figura 4.10 – Campo de pressões no fim do enchimento “Placa”	75
Figura 4.11 – Campo de pressões no fim do enchimento “Ficha”	75
Figura 4.12 – Campo de pressões no fim do enchimento “Engate plástico”	76
Figura 4.13 – Contracção volumétrica “placa”	77
Figura 4.14 – Contracção volumétrica “ficha”	77
Figura 4.15 – Contracção volumétrica “engate plástico”	78
Figura 4.16 – Defeitos na “placa” após extracção.....	79
Figura 4.17 – Peça com chupados	79
Figura 4.18 – Peça com o SL partido	79
Figura 4.19 – Postiço SL partido no ataque.....	79
Figura 4.20 – 2ª pressão 0 Switch 11	80
Figura 4.21 – 2ª pressão 12 Switch 11	80
Figura 4.22 – 2ª pressão 7 Switch 11	80
Figura 4.23 – 2ª pressão 7 Switch 12	80
Figura 4.24 – Peça com rebarba	81
Figura 4.25 – Deterioração da aresta do SL	81
Figura 4.26 – Obtenção de apenas 1 peça por injeccção.....	81
Figura 4.27 – Curvas experimentais nos termopares T1 e T2 para uma temperatura de início de ciclo de 40°C e para um tempo de arrefecimento com o molde fechado de 40s	82
Figura 4.28 – Temperatura de início de ciclo 40°C tempo arref. molde fechado 40s	83
Figura 4.29 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 35s	83
Figura 4.30 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 45s	84
Figura 4.31 – Temperatura de início de ciclo 55°C tempo arref. molde fechado 40s	84
Figura 4.32 – Tempo de ciclo em função da temperatura de início de ciclo para vários tempos de arrefecimento com molde fechado.....	85
Figura 4.33 – Temperatura máxima em função da temperatura de início de ciclo para vários tempos de arrefecimento com molde fechado.....	86
Figura 4.34 – Aparecimento de rebarba na linha de partição ao longo do tempo	87
Figura 4.35 – “Ficha” temperaturas nos 4 termopares para tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s	88
Figura 4.36 – Disposição dos termopares “ficha”	88
Figura 4.37 – “Ficha” temperatura do termopar T1 para vários tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s	89
Figura 4.38 – “Ficha” temperatura do termopar T2 tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s	89
Figura 4.39 – “Ficha” temperatura do termopar T3 para vários tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s	90
Figura 4.40 – “Ficha” temperatura do termopar T4 para vários tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s	90

Figura 4.41 – “Ficha” nós na região do termopar 1.....	91
Figura 4.42 – “Ficha” comparação entre a curva experimental e as simulações para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 1.....	91
Figura 4.43 – Representação da cola com 0.5mm de espessura.....	92
Figura 4.44 – “Ficha” comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 1.....	93
Figura 4.45 – “Ficha” comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 2.....	93
Figura 4.46 – “Ficha” comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 3.....	94
Figura 4.47 – “Ficha” temperatura aos 100s.....	95
Figura 4.48 – “Ficha” temperatura aos 132s.....	95
Figura 4.49 – “Ficha” temperatura aos 180s.....	95
Figura 4.50 – “Ficha” pontos na superfície do SL.....	96
Figura 4.51 – “Ficha” temperatura dos pontos na superfície moldante do SL.....	96
Figura 4.52 – Peça em Poliestireno.....	97
Figura 4.53 – Peça em Polipropileno.....	97
Figura 4.54 – Aparecimento de vazios.....	97
Figura 4.55 – Aparecimento de rebarba.....	97
Figura 4.56 – “Engate” temperaturas injeção PS nos 5 termopares para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	98
Figura 4.57 – Disposição dos termopares “engate plástico”.....	98
Figura 4.58 – “Engate” temperatura no termopar T1 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	99
Figura 4.59 – “Engate” temperatura no termopar T4 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	99
Figura 4.60 – “Engate” temperaturas injeção PP nos 5 termopares para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	100
Figura 4.61 – “Engate” temperatura no termopar T1 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	100
Figura 4.62 – “Engate” temperatura no termopar T4 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	101
Figura 4.63 – “Engate” temperatura no termopar T1 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	102
Figura 4.64 – “Engate” temperatura no termopar T4 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	102
Figura 4.65 – “Engate” temperatura no termopar T5 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	103
Figura 4.66 – “Engate” PS comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 1.....	105
Figura 4.67 – “Engate” PP comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 1.....	105
Figura 4.68 – “Engate” PS com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 3.....	106
Figura 4.69 – “Engate” PP com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 3.....	106
Figura 4.70 – “Engate” PS com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 4.....	107
Figura 4.71 – “Engate” PP com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 4.....	107
Figura 4.72 – “Engate” PS temperatura aos 132s.....	108

Figura 4.73 – “Engate” PS temperatura aos 180s.....	108
Figura 4.74 – “Engate” PP temperatura aos 132s.....	108
Figura 4.75 – “Engate” PP temperatura aos 180s.....	109
Figura 4.76 - Moldação	109
Figura 4.77 – “Engate” corte do postigo SL.....	109
Figura 4.78 – Pontos na superfície da SL.....	110
Figura 4.79 – “Engate” PS temperatura dos nós na superfície moldante do SL	110
Figura 4.80 – “Engate” PP temperatura dos nós na superfície.....	111
Figura 8.1 – Variação do volume específico com a temperatura	I
Figura 8.2 – Variação da viscosidade com a taxa de corte.....	I
Figura 8.3 – Variação do volume específico com a temperatura	III
Figura 8.4 – Variação da viscosidade com a taxa de corte.....	III
Figura 8.5 – Injectora ENGEL ES200/45 HL–V	I
Figura 8.6 – Injectora KLOCKNER FERROMATIC FM20	II
Figura 8.7 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 100s	I
Figura 8.8 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 120s	I
Figura 8.9 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 130s	I
Figura 8.10 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 135s	I
Figura 8.11 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 180s	I
Figura 8.12 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 210s	I
Figura 8.13 – “Ficha” tempo de ciclo 100s	II
Figura 8.14 – “Ficha” tempo de ciclo 120s	II
Figura 8.15 – “Ficha” tempo de ciclo 130s	III
Figura 8.16 – “Ficha” tempo de ciclo 135s	III
Figura 8.17 – “Ficha” tempo de ciclo 180s	IV
Figura 8.18 – “Ficha” tempo de ciclo 210s	IV
Figura 8.19 – Injecção de PS com um tempo de ciclo 130s.....	V
Figura 8.20 – Injecção de PP com um tempo de ciclo 130s.....	V
Figura 8.21 – Injecção de PS com um tempo de ciclo 180s.....	V
Figura 8.22 – Injecção de PP com um tempo de ciclo 180s.....	V
Figura 8.23 – Injecção de PS com um tempo de ciclo 210s.....	V
Figura 8.24 – Injecção de PS com um tempo de ciclo 230s.....	V
Figura 8.25 – Injecção de PP com um tempo de ciclo 230s.....	V
Figura 8.26 – “Engate” PS tempo de ciclo 130s.....	VI
Figura 8.27 – “Engate” PS tempo de ciclo 180s.....	VI
Figura 8.28 – “Engate” PS tempo de ciclo 230s.....	VII
Figura 8.29 – “Engate” PP tempo de ciclo 130s.....	VII
Figura 8.30 – “Engate” PP tempo de ciclo 180s.....	VIII
Figura 8.31 – “Engate” PP tempo de ciclo 230s.....	VIII
Figura 8.32 – “Engate” temperatura no termopar T2 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	IX
Figura 8.33 – “Engate” temperatura no termopar T3 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	IX
Figura 8.34 – “Engate” temperatura no termopar T5 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	X
Figura 8.35 – “Engate” temperatura no termopar T2 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	X
Figura 8.36 – “Engate” temperatura no termopar T3 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	XI

Figura 8.37 – “Engate” temperatura no termopar T5 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s.....	XI
Figura 8.38 – “Engate” temperatura no termopar T2 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s	XII
Figura 8.39 – “Engate” temperatura no termopar T3 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s	XII
Figura 8.40 – Temperatura de início de ciclo 40°C tempo arref. molde fechado 40s	I
Figura 8.41 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 40s	I
Figura 8.42 – Temperatura de início de ciclo 40°C tempo arref. molde fechado 45s	II
Figura 8.43 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 35s	II
Figura 8.44 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 40s	II
Figura 8.45 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 45s	III
Figura 8.46 – Temperatura de início de ciclo 50°C tempo arref. molde fechado 35s	III
Figura 8.47 – Temperatura de início de ciclo 50°C tempo arref. molde fechado 40s	III
Figura 8.48 – Temperatura de início de ciclo 50°C tempo arref. molde fechado 45s	IV
Figura 8.49 – Temperatura de início de ciclo 50°C tempo arref. molde fechado 40s	IV
Figura 8.50 – Temperatura de início de ciclo 55°C tempo arref. molde fechado 35s	IV
Figura 8.51 – Temperatura de início de ciclo 55°C tempo arref. molde fechado 40s	V
Figura 8.52 – Temperatura de início de ciclo 55°C tempo arref. molde fechado 45s	V
Figura 8.53 – Ficha” comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 4.....	VI
Figura 8.54 – “Engate” PS com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 2	VII
Figura 8.55 – “Engate” PP com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 2	VII
Figura 8.56 – “Engate” PS com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 5	VIII
Figura 8.57 – “Engate” PP com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 5	VIII

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Pesos e pontuação para os vários módulos [13]	13
Tabela 2-2 – Resultados para as várias orientações [13]	13
Tabela 2-3 – Materiais de Estereolitografia	22
Tabela 2-4 – Folgas mínimas secção circular (movimento na vertical e de torção) e prismática [22]	23
Tabela 2-5 – Folgas mínimas para insertos secção circular e rectangular [22]	24
Tabela 2-6 – Vida do molde para as várias razões de largura e espessura [35]	37
Tabela 3-1 – Propriedades da água [39]	65
Tabela 3-2 – Propriedades da Resina SL, da peça, do enchimento e do alumínio	65
Tabela 3-3 – Temperatura de referência e tempo de arrefecimento com molde fechado utilizados na simulação da “placa”	66
Tabela 3-4 – Variação dos tempos de ciclo para “ficha”	67
Tabela 3-5 – Variação dos tempos de ciclo para “engate”	68
Tabela 4-1 – Parâmetros durante a afinação	80
Tabela 4-2 – Esquema da combinação da temperatura de início de ciclo e do tempo de arrefecimento com o molde fechado	82
Tabela 4-3 – Variação dos tempos de ciclo para “ficha”	87
Tabela 4-4 – “Ficha” Desvios da temperatura máxima das simulações em relação à curva experimental	94
Tabela 4-5 – Variação dos tempos de ciclo para “engate”	97
Tabela 4-6 – Comparação de propriedades térmicas entre PS e PP	103
Tabela 4-7 – “Engate” Desvios da temperatura máxima das simulações em relação à curva experimental	104
Tabela 8-1 – Propriedades relevantes para PS Lacqrene 4241 (segundo fabricante)	II
Tabela 8-2 – Propriedades relevantes para PP Borealis 0D3510	IV
Tabela 8-3 – Propriedades relevantes para Accura SI40 (segundo fabricante)	V
Tabela 8-4 – Propriedades da resina utilizadas pelo MPI	V
Tabela 8-5 – Características da Injectora ENGEL ES200/45 HL–V	I
Tabela 8-6 – Características da KLOCKNER FERROMATIC FM20	II
Tabela 8-7 – Condições de processamento para “placa”	III
Tabela 8-8 – Condições de processamento para “Ficha eléctrica”	III
Tabela 8-9 – Condições de processamento para “Engate plástico”	IV
Tabela 8-10 – Propriedades da água a 80 °F (26.67 °C) [39] para ALGOR	V
Tabela 8-11 – Propriedades dos materiais para simulação em ALGOR	V
Tabela 8-12 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow inicial	I
Tabela 8-13 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow – Cool – Flow	I
Tabela 8-14 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow inicial	II
Tabela 8-15 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow – Cool – Flow	II
Tabela 8-16 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow inicial	III
Tabela 8-17 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow – Cool – Flow	III
Tabela 8-18 – Relatório da estatística Malha (inicial só meia peça) com tamanho da aresta 2mm e tolerância 0.01	IV
Tabela 8-19 – Estatística da Malha (inicial só peça) com tamanho da aresta 2mm e tolerância 0.01	IV
Tabela 8-20 – Estatística da Malha (final com refrigeração e molde)	V
Tabela 8-21 – Relatório da estatística da malha ficha eléctrica antes da correcção	VI

Tabela 8-22 – Estatística da malha (inicial só peça) tamanho da aresta 2mm e tolerância 0.01	VI
Tabela 8-23 – Estatística da Malha (final com refrigeração e molde).....	VII
Tabela 8-24 – relatório da estatística da malha engate plástico macho antes da correção	VIII
Tabela 8-25 – Estatística da Malha (inicial só peça) tamanho da aresta 2mm e tolerância 0.01	VIII
Tabela 8-26 – Estatística da Malha (final com refrigeração e molde).....	IX

Lista de Siglas

3D	Tridimensional	Tridimensional
3D Printing	3 Dimensional Printing	Impressoras 3 Dimensões
ACES	Accurate Clear Epoxy Solid	Estrutura Precisa em Epoxi Transparente
AMS	Arc Metal Spray	Projectão de Partículas Metálicas
CAD	Computer Aided Design	Projecto Auxiliado por Computador
CAE	Computer Aided Engineering	Engenharia Auxiliada por Computador
CMM	Coordinate Measuring Machine	Máquina de Medição de Coordenadas
CT	Computed Tomography	Tomografia Computorizada
Direct AIM	Direct Aces Injection Moulding	Utilização Directa da Estereolitografia em RT
IGES (BSI)	International Graphics Exchange Standard	Formato comum para transferência de dados
STEP (ISO)	STandard for Exchange of Product data	Formato padrão para o intercâmbio de dados
FDM	Fused Deposition Modelling	Fusão e Deposição de Materiais
LOM	Laminated Object Manufacturing	Laminação de Objectos para Modelos
LTS	Laser Triangulation Scanner	Triangulação Laser
MRI	Magnetic Ressonance Imaging	Imagem por Ressonância Magnética
PP	Polypropylene	Polipropileno
PS	Polystyrene	Poliestireno
RE	Reverse Engineer	Engenharia Inversa
RP	Rapid Prototyping	Prototipagem Rápida
RT	Rapid Tooling	Fabrico Rápido de Ferramentas
SL	Stereolithography	Estereolitografia
SLA	Stereolithography Apparatus	Máquina de Estereolitografia
SLS	Selective Laser Sintering	Sinterização Selectiva a Laser
STL	Standard Triangulation Language	Formato padrão de arquivos de PR
UV	Ultraviolet	Ultra Violeta

1 Introdução

Hoje em dia as empresas têm de lançar muito rapidamente os seus produtos no mercado. Neste mercado cada vez mais competitivo, torna-se crucial a redução do tempo de desenvolvimento até à entrada no mercado e garantir que esses produtos tenham a qualidade necessária [1]. Assim como se diz que “Uma imagem vale mais que 1000 palavras”, os utilizadores da estereolitografia defendem “que um protótipo vale mais que 1000 imagens” [2]. A prototipagem rápida permite num curto espaço de tempo, otimizar o design e a concepção dos produtos, assim como a realização de testes funcionais e corrigir erros de concepção antes da sua entrada em produção.

A maior parte dos custos de fabrico têm origem na fase de desenvolvimento [3]. A alteração no design de um produto ou da sua funcionalidade quando este já se encontra nas fases produção e comercialização, implicam custos muito elevados. Estima-se que se estas alterações tivessem sido realizadas nas fases de prototipagem ou de ensaios o seu custo seria cerca de 100 vezes menor [4].

Este reconhecimento está na origem do conceito de Engenharia Concorrente ou Simultânea, que fomenta a aproximação das equipas de designers, projectistas, responsáveis da produção e outros sectores do ciclo produtivo. Estas equipas multidisciplinares deverão investir um maior esforço nas fases de concepção e de projecto de modo a obter o máximo de informação possível e a realizar mais alterações de design ou de projecto. Deste modo as despesas de fabrico são reduzidas e o tempo de colocação dos produtos no mercado também diminui.

1.1 Objectivos

A parte experimental do trabalho de dissertação apresentado decorreu no Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho e insere-se no mestrado de Projecto e Fabrico de Moldes. A tecnologia utilizada para a construção das cavidades moldantes foi a estereolitografia.

Os objectivos da presente dissertação são:

- Contribuir para o conhecimento da utilização da estereolitografia para a construção de cavidades moldantes e sua utilização directa na injeção de termoplásticos, tornando mais expedita a sua utilização futura.
- Construir cavidades moldantes de estereolitografia de diferentes geometrias, para estudar o seu comportamento na injeção de termoplásticos.
- Validar experimentalmente os postigos utilizados.
- Recolher dados experimentais da temperatura em diferentes pontos dos postigos para validar os resultados obtidos com a utilização de ferramentas informáticas de simulação.

1.2 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em 6 capítulos. No presente capítulo é apresentado o enquadramento do estudo. Novas tecnologias de fabrico rápido de protótipos surgem da necessidade de reduzir os custos e o tempo de lançamentos dos produtos no mercado.

No segundo capítulo é apresentado o estado actual da SL e a sua utilização directa em moldes de injeção. São apresentados estudos publicados sobre temas relevantes para esta dissertação.

No terceiro capítulo são apresentadas as várias peças do estudo. São descritas as diferentes formas e pormenores dos vários postigos. É descrita a forma como foram instrumentados. São descritos os procedimentos utilizados para a fase de simulações e para a parte experimental do estudo.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente. É feita a comparação entre os resultados das simulações com os obtidos experimentalmente.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do estudo.

No capítulo final são indicados alguns temas como sugestão para trabalhos futuros.

2 Estado da arte

2.1 Prototipagem Rápida

As ferramentas de RP surgiram no final dos anos 80 e permitem construir modelos tridimensionais muito rapidamente, o que reduz o tempo entre as alterações a um modelo e a sua validação. Nestas tecnologias estão incluídas a Estereolitografia (SL), Sinterização Selectiva a Laser (SLS-Selective Laser Sintering), Laminação de Objectos para Modelos (LOM-Laminated Object Manufacturing), Fusão e Deposição de Materiais (FDM-Fused Deposition Modelling) e Impressoras 3D (3D Printing).

Desde o início da década de 90, o método de prototipagem rápida mais utilizado tem sido a estereolitografia (SL). Este processo foi patenteado em 1986 pela empresa 3D Systems. Constrói modelos tridimensionais a partir de uma resina fotopolimérica líquida (epoxídica ou acrílica) que polimeriza sob a acção da luz ultra violeta do laser.

Com estes protótipos, é possível visualizar e verificar geométrica e dimensionalmente a peça. No entanto, os testes funcionais apresentam resultados diferentes no caso do protótipo e da peça de fabrico. Os materiais em que são construídos são diferentes e no processo de fabrico por injeção devido ao arrefecimento e orientação molecular, este introduz diferentes propriedades em relação aos protótipos [4].

Devido à boa precisão dos modelos de estereolitografia, estes são muitas vezes utilizados para a construção indirecta de ferramentas de RT. São casos disso, os moldes de silicone, o processo dos modelos perdidos (Investment Casting) e os moldes de areia.

Quanto à utilização da estereolitografia directamente em ferramentas de fabrico rápido, esta é denominada de Direct AIM (Direct Aces Injection Moulding) desenvolvido pelo Institute for plastics Innovation em conjunto com a 3D Systems [5].

Este processo apresenta grandes limitações na quantidade de peças obtidas. As resinas utilizadas no processo de estereolitografia, apresentam baixa condutibilidade térmica ($k \approx 0.18 \text{ W/mK}$) [6] e diminuição substancial da resistência mecânica quando

submetidas às temperaturas do processo de injeção. Devido a estas deficiências, a espessura da casca deve ser bastante reduzida.

2.2 Processo integrado de fabrico

Um bom desenvolvimento do produto deve permitir ao projectista considerar todos os aspectos do design do produto, o fabrico, a venda e a reciclagem numa fase inicial do projecto. Deste modo as alterações podem ser realizadas mais fácil e rapidamente. A engenharia concorrente ou simultânea define que o produto e o processo devem ser desenvolvidos de forma simultânea e não sequencialmente.

Segundo *Yucheng et al* [3], o processo do fabrico integrado de RT é composto por 4 módulos: Protótipo Digital (Digital Prototype), Protótipo Virtual (Virtual Prototype), Protótipo Físico (Physical Prototype) e Fabrico Rápido de Ferramentas (Rapid Tooling). Estas fases estão representadas na Figura 2.1.

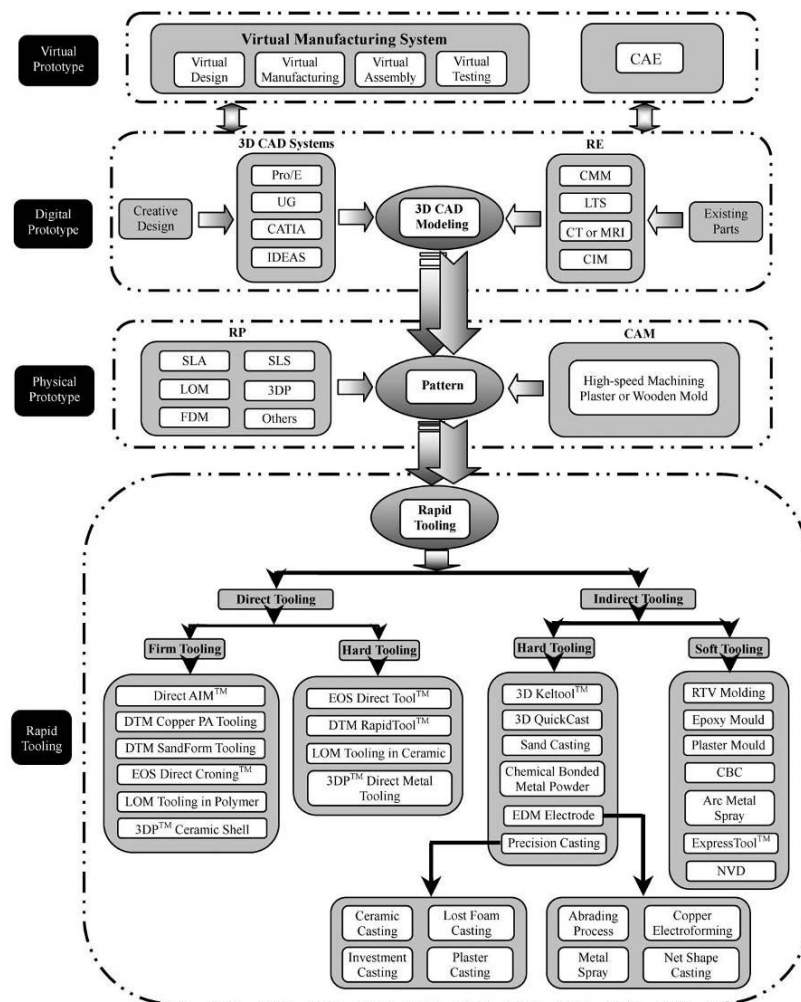


Figura 2.1 – Arquitectura de um processo integrado de fabrico [3]

2.2.1 Protótipo Digital (Digital Prototype)

O desenvolvimento do molde pode começar de 2 maneiras: através de modelos CAD ou a partir de uma peça já existente. Para modelar a peça ou o molde a 3D, podemos utilizar software comercial como o Pro Engineer, Unigraphics, Catia, Ideas, Solid Works, Inventor. Se for a partir de uma peça já existente, por exemplo, a peça de um concorrente ou um modelo construído por técnicas manuais, neste caso podemos usar a Engenharia Inversa (Reverse Engineer – RE) e recorrer à digitalização 3D com o objectivo de criar modelos CAD.

2.2.2 Protótipo Virtual (Virtual Prototype)

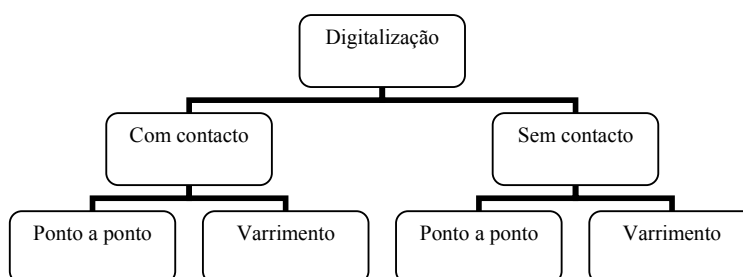


Figura 2.2 – Tipos de digitalização [9]

Os sistemas de digitalização disponíveis no mercado dividem-se geralmente em 2 grandes grupos: com contacto e sem contacto. Com contacto e ponto a ponto temos o CMM (Coordinate Measuring Machine). Sem contacto e ponto a ponto temos a triangulação laser (LTS – Laser Triangulation Scanner), e por varrimento sem contacto a imagem por ressonância magnética (MRI – Magnetic Resonance Images) e Tomografia computadorizada (CT – Computer Tomography)

2.2.3 Protótipo Físico (Physical Prototype)

Para reduzir as alterações ao projecto e os testes em protótipos, podemos otimizar o projecto do molde e o processo de fabrico num ambiente virtual. Podemos utilizar este modelo virtual para fazer simulações de CAE (Computer Aided Engineering). CAE é especialmente útil para prever o enchimento, a pressão e a temperatura e a transferência de calor para o fluido de refrigeração durante o processo de injeção. Também é utilizado para otimizar a geometria da peça, para definir as dimensões das cavidades

moldantes e para controlar a contracção e minimizar as tensões e empenos das peças. Como exemplos destes softwares temos o Ansys, Algor, Moldflow, Moldex, I-deas, Autoform, Dynaform.

As ferramentas de RP surgiram no final dos anos 80 e permitem construir modelos 3D muito rapidamente, o que reduz o tempo entre as alterações a um modelo e a sua validação. Contrariamente às técnicas tradicionais de maquinagem, a maior parte dos sistemas de RP constrói peças por processos aditivos, em vez da remoção de material. Estes processos não estão sujeitos às restrições da maquinaria convencional, pelo que podem ser construídos modelos que seriam impossíveis por outras técnicas de remoção.

2.2.4 Fabrico Rápido de Ferramentas (Rapid Tooling)

As técnicas de RT permitem utilizar os modelos de RP em ferramentas de fabrico para a produção de peças de plástico. Permitem uma resposta muito rápida para a introdução de produtos no mercado, tornando-se num novo factor de competitividade. Podem ser classificados em processos **directos** e **indirectos**.

Os processos de fabrico **directo** envolvem o fabrico das cavidades directamente da RP, não necessitando da construção de um modelo como no caso dos **processos indirectos**, mas utilizam equipamentos de elevado custo.

Estas ferramentas podem ser divididas pelos materiais que utilizam e pelo número de peças que podem fabricar em Ferramentas duras (**Hard tooling**), ferramentas macias (**Soft tooling**) e ferramentas médias (**Firm tooling**) [4].

As ferramentas macias (**Soft Tooling**) estão relacionadas com baixos custos, produção de pequenas séries, e utilização de materiais com pouca dureza como silicones, resinas epoxidicas e ligas de baixo ponto de fusão. A tecnologia mais utilizada é o fabrico de moldes de silicone.

As ferramentas duras (**Hard Tooling**) são realizadas em ligas de aço, alumínio ou cobre. Fabricam-se ferramentas para fabricar milhares de peças, constituindo uma alternativa às técnicas tradicionais de fabrico de moldes.

As ferramentas médias (**Firm Tooling**) são mais rápidas de fabricar e têm custos mais reduzidos em relação às de hard tooling. Os métodos de Firm Tooling usam um modelo construído por uma técnica de RP para o fabrico do molde. Permitem obter ferramentas a partir de materiais metálicos, cerâmicos e plásticos. As ferramentas metálicas são as que têm maior durabilidade com ciclos térmicos mais curtos devido à sua condutibilidade térmica. Os cerâmicos geralmente surgem em fases intermédias do fabrico das ferramentas e exigem sinterização a elevadas temperaturas. Os plásticos permitem obter ferramentas económicas, de duração reduzida e prazos reduzidos.

2.2.4.1 Ferramentas SL Indirecto

Devido à boa precisão dos modelos de estereolitografia, estes são muitas vezes utilizados para a construção indirecta de ferramentas de RT. São os casos dos moldes de silicone, o processo dos modelos perdidos (Investment Casting), moldes de areia, projecção de partículas metálicas (Arc Metal Spray).

2.2.4.2 Utilização directa de ferramentas de SL

A ideia de injectar materiais plásticos em moldes fabricados em SL parece ser impossível. As resinas de estereolitografia têm uma temperatura de transição vítrea de cerca de 75 °C [7] [5], enquanto que os plásticos que são injectados nessas cavidades têm uma temperatura do fundido que pode atingir os 250 °C [5] ou mesmo os 300 °C [7]. Quanto à utilização **directa** da estereolitografia em ferramentas de fabrico rápido, estas podem utilizar **insertos sólidos ACES (Accurate Clear Epoxy Solid)** ou em forma de casca **Direct AIM**. Estes assuntos serão mais aprofundados nos pontos 2.4 e 2.5.

2.3 Estereolitografia

Este processo foi patenteado em 1986 pela empresa 3D Systems. Constrói modelos tridimensionais a partir de uma resina fotopolimérica líquida (epoxídica ou acrílica) que polimeriza sob a acção da luz ultra violeta do laser. Os principais componentes de um equipamento de estereolitografia são: o laser, os espelhos, o elevador, o espalhador, a plataforma e a cuba de resina, como indicado na Figura 2.3.

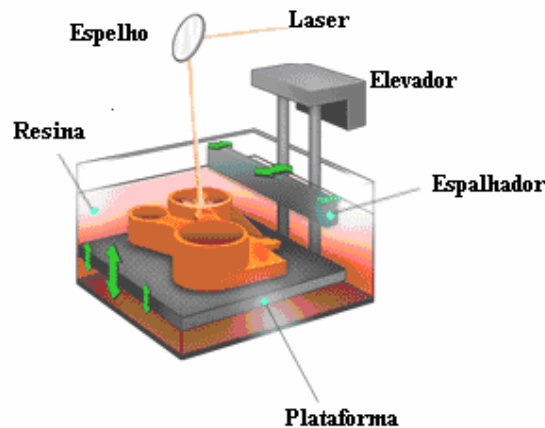


Figura 2.3 – Principais componentes da máquina de estereolitografia [8]

As resinas acrílicas são curadas apenas parcialmente durante a construção e apresentam uma cor amarelada translúcida. A cura final é executada posteriormente com raios UV. As epoxídicas são mais resistentes, claras e têm um melhor acabamento nas superfícies horizontais. Estas resinas curam praticamente durante a construção. No entanto a construção é mais lenta e em resultado disso as peças construídas com estas resinas têm um custo superior.

2.3.1 Processo de Estereolitografia

O processo inicia-se com um modelo CAD 3D (Figura 2.4) que é transformado no formato **STL** (Standard Triangulation Language), que foi adoptado como um formato padrão da indústria da prototipagem rápida. Inicialmente projectado em 1988, este formato foi uma herança do PHIGS (Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System), uma representação interna de objectos 3D.

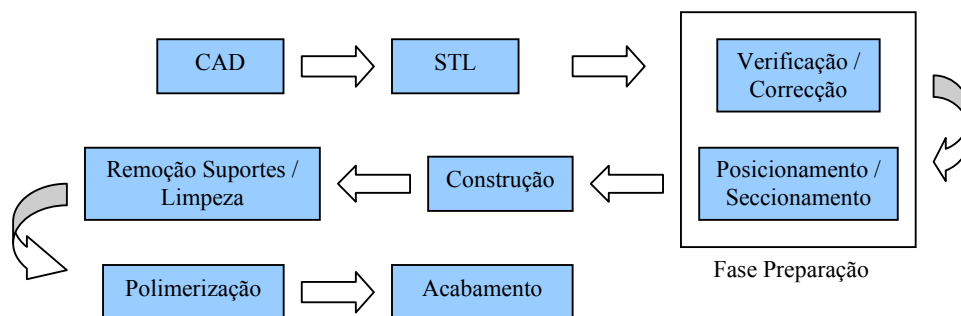


Figura 2.4 – Etapas do processo de Estereolitografia adaptado de [9]

Hoje em dia quase todos os programas de CAD têm tradutores incluídos, pelo que esta transformação é apenas um “guardar como” com a extensão STL. Este formato

representa superfícies tridimensionais como uma montagem de triângulos planos (como uma jóia lapidada).

O ficheiro é uma malha de triângulos tridimensionais, cujos vértices (definidos pelas suas coordenadas x , y e z) são ordenados para indicarem qual o lado exterior da peça. Isto é, pela regra do parafuso, rodando do vértice 1 para o 2, temos o sentido da normal ao triângulo que nos indica o exterior (Figura 2.5 e Figura 2.6).

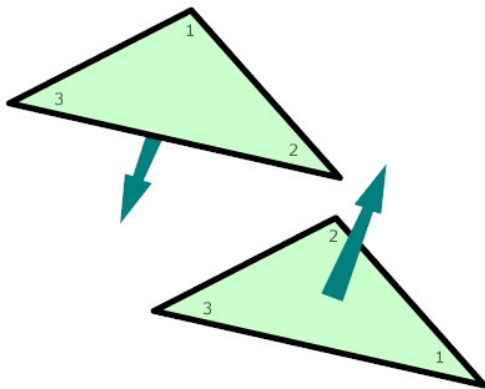


Figura 2.5 – Normais aos triângulos

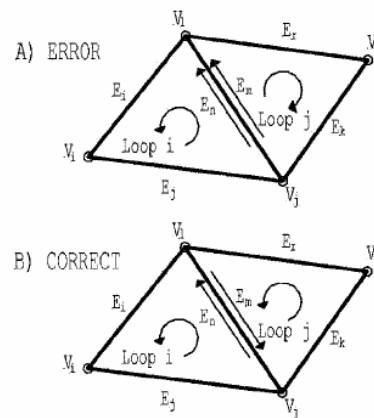
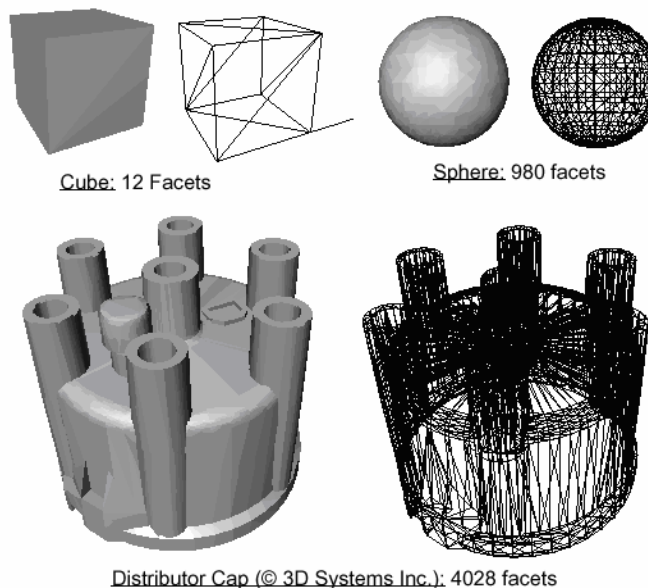


Figura 2.6 – Normais aos triângulos [10]

Cada bordo tem de ser comum a 2 triângulos. Os triângulos só se podem intersectar nos seus vértices e cada triângulo tem de ter 3 triângulos adjacentes. Como os ficheiros STL utilizam elementos planos, eles não conseguem representar uma superfície curva com exactidão. Na Figura 2.7 está representado um cubo dividido em 12 triângulos, uma esfera em 980 triângulos e uma tampa de distribuidor em 4028 triângulos.



Distributor Cap (© 3D Systems Inc.): 4028 facets

Figura 2.7 – Exemplos de ficheiros STL [11]

Na Figura 2.8 está representada uma superfície curva através linhas rectas, mostrando como surgem erros de convexidade e concavidade.

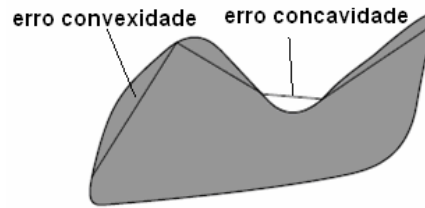


Figura 2.8 – Erro de convexidade e concavidade [12]

Aumentando o número de triângulos, melhoramos a resolução, mas também o ficheiro fica maior. Ficheiros muito grandes necessitam de um tempo de processamento e de construção elevado. Para ser considerado um bom ficheiro STL, estes devem ter um equilíbrio entre a precisão requerida e o seu tamanho.

Estes ficheiros têm que ser visualizados em programas apropriados, para que se possa determinar se há erros. Alguns tipos de erros que ocorrem são vazios ou triângulos invertidos. Os vazios surgem do facto de uma peça tridimensional ser representada em planos bidimensionais. Outro erro vulgar é as normais de 2 triângulos adjacentes estarem invertidas. Os programas comerciais permitem correcções automáticas ou manuais deste tipo de erros, mas nem todos os ficheiros podem ser reparados.

O passo seguinte é definir o local onde a peça é construída na plataforma e qual a sua posição em função da sua geometria. A melhor posição da peça na plataforma é uma relação de compromisso entre o tempo de fabrico, custo e tolerância dimensional.

Pham et al [13] apresentam 6 módulos para a tomada de decisão da melhor posição na plataforma, que são os módulos: da orientação, dos suportes, do tempo, do custo, das geometrias problemáticas e da visualização.

As superfícies críticas devem ter a normal segundo a direcção de construção, isto é devem estar na horizontal. Cilindros, cones e superfícies de revolução devem ter o seu eixo vertical. Os furos devem ser construídos perpendicularmente ao plano vertical, de modo a evitar a construção e remoção de suportes no seu interior. As superfícies que servem de guias devem estar na horizontal, de forma a terem o melhor acabamentos superficial. Todos os eixos devem estar na vertical. As cascas devem estar orientadas de

maneira a que o lado côncavo esteja para cima, de forma a minimizar os suportes internos.

Devido aos protótipos serem construídos imersos num ambiente líquido (resina líquida que é a matéria prima) sob uma plataforma, estes necessitam de serem suportados para que as superfícies não se deformem e para dar consistência ao modelo que permita a sua retirada da plataforma após o fabrico. O software que automaticamente analisa as superfícies que necessitam de serem suportadas, gera os respectivos suportes. Esta informação fica em 2 ficheiros separados, um da peça e outro relativo aos suportes.

As superfícies onde são colocados os suportes apresentam um acabamento pior e irão necessitar de acabamento. O volume dos suportes irá afectar o tempo de construção e o custo da peça. Algumas geometrias podem ser construídas sem necessitarem de suporte, as suas dimensões máximas estão representadas na Figura 2.9.

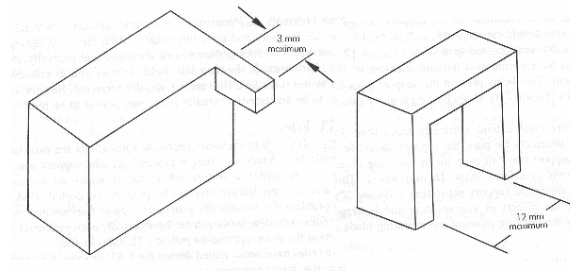


Figura 2.9 – Máximas dimensões de geometrias que não necessitam de suportes [2]

No fabrico de peças por estereolitografia o tempo é um parâmetro muito importante. As várias posições em que uma peça ser posicionada, conduzem a diferentes tempos de construção. O tempo está directamente relacionado com a altura da peça. A altura dos suportes também afecta o tempo de construção, mas não de uma forma tão significativa. Um dos parâmetros mais importantes na RP é a espessura de camada (a-layer thickness). Camadas mais espessas nem sempre representam um menor tempo de construção. Se por um lado, camadas mais espessas reduzem o número de camadas necessárias para a construção duma peça, o que tornaria o processo mais rápido, por outro lado camadas mais espessas implicam um maior tempo do laser.

Jacobs [2] demonstra a relação entre a velocidade do laser (V_s) e a profundidade de cura (C_d).

$$C_d = D_p \ln\left(\frac{E_{\max}}{E_c}\right)$$

Equação 4.32 de [2]

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s}$$

Equação 4.33 de [2]

A profundidade de penetração do laser (D_p) e Exposição crítica (E_c) são constantes da resina e que a potência do laser (P_L) está fixada. Que W_0 é raio do laser (geralmente 0.005”).

Considerando que a energia por área em relação ao afastamento do ponto central obedece a uma distribuição de Gauss e combinando as 2 equações, verifica-se que a velocidade do laser V_s é inversamente proporcional a e^{C_d}

$$V_s \approx \frac{1}{e^{C_d}}$$

Portanto, a velocidade do laser decresce exponencialmente com o aumento da profundidade de cura, o que implica um aumento do tempo do laser, mas por sua vez também reduz o número de camadas para a construção da peça. O tempo de construção vai ser influenciado tanto pela velocidade do laser, como pelo número de camadas.

Jacobs [2] apresenta um gráfico com o tempo de construção para a resina XB-5081-1 em função da espessura da camada (a) para várias potências do laser (P_L) (Figura 2.10).

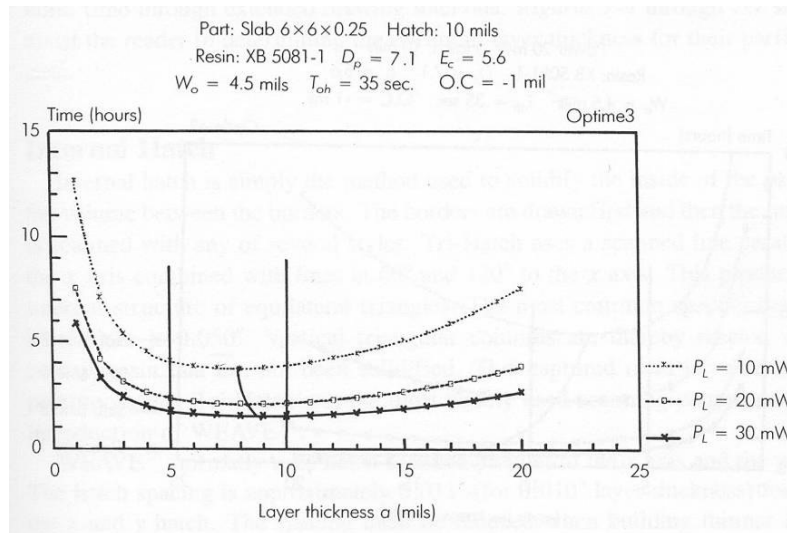


Figura 2.10 – Tempo de construção em função da espessura de camada (1mils=0.001”) [2]

Dependendo da potência do laser, da foto sensibilidade da resina, da área da peça, da espessura de camada, a uma construção mais rápida situa-se na espessura de camada (a) de 0.005 a 0.010” [2].

É importante fabricar peças o mais baratas possível, sem comprometer o tempo e a tolerância.

Ao ser escolhida uma determinada orientação para favorecer uma geometria importante, outras podem ficar orientadas de modo a que a sua construção em termos de acabamento superficial ou geométrico seja inaceitável. Para cada orientação escolhida, devem ser identificadas e numeradas as geométricas problemáticas.

Depois de processados os dados, podemos escolher a melhor orientação com base no custo, no tempo, no número de problemas que surjam durante a construção, numa orientação preferencial para uma determinada geometria, pelo volume dos suportes, pela área das superfícies da peça com suportes ou de uma forma mais automática pelo estabelecimentos de pesos para cada um destes critérios.

Tabela 2-1 – Pesos e pontuação para os vários módulos [13]

Module	Weight
Problematic features	3
Optimally oriented features	3
Cost	2
Time	2
Support volume	1
Support attachment	1
Module	Score
Winning orientation	5
Second orientation	3
Third orientation	2
Fourth orientation	1
Others	0

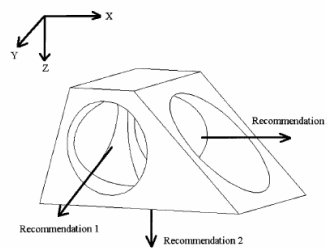


Figura 2.11 – Várias orientações para a construção [13]

Tabela 2-2 – Resultados para as várias orientações [13]

Part 1	
z-Vector	0, 1, 0
Cost	£81
Time	52 m
Orient features	2[axis, hole]
Problem features	2[axis, hole]
Overhanging area	31.71
Support volume	8.57
z-Vector	1, 0, 0
Cost	£100
Time	1 h 12 min
Orient features	2[hole, axis]
Problem features	2[hole, axis]
Overhanging area	25.47
Support volume	6.62
z-Vector	0, 0, 1
Cost	£81
Time	52 m
Orient features	1[coordinate system]
Problem features	4[2 holes, 2 axes]
Overhanging area	68.71
Support volume	28.92

De seguida, estes dois ficheiros da peça e dos suportes são seccionados (Slice) em camadas paralelas. Durante esta etapa a espessura de camada (a geralmente de 0.01-0.7mm, dependendo da precisão e do tempo de construção pretendido), o tipo de construção, a profundidade de cura (C_d), o espaçamento entre linhas polimerizadas (h_s em x e y), a compensação da largura do contorno (linewidth) e o factor de compensação da contracção (shrinkage compensation) são seleccionados.

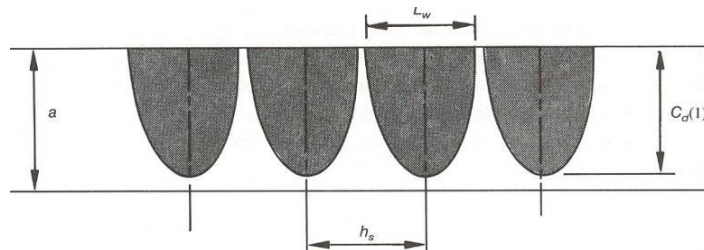


Figura 2.12 – Secção de linhas polimerizadas [2]

Para o contorno da peça, o laser deve sofrer um deslocamento (offset) de metade da largura (linewidth) para o interior da peça (Figura 2.13).

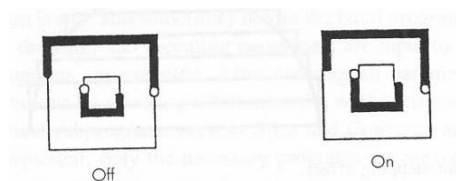


Figura 2.13 – Compensação da largura da linha (linewidth) Esq.-desligado Dir.-ligado [2]

Os ficheiros já seccionados dão entrada na máquina de estereolitografia. São definidos os parâmetros de construção para a peça e suportes separadamente. Estes 2 ficheiros são juntos (merged) de maneira a garantir que a construção é feita na ordem correcta, como se tratasse de uma peça única. O processo ocorre de forma automática, sem qualquer intervenção do técnico.

As diversas fases da construção de um modelo de SL estão representadas na Figura 2.14. O laser vai iluminar a camada na plataforma que está imersa no tanque de resina, construído em simultâneo a peça (Figura 2.14 – 1) e os respectivos suportes (estruturalmente mais frágeis para possibilitar a sua posterior remoção).

Após a construção de uma camada, a plataforma desce uma altura equivalente à espessura de camada (a) seleccionada (Figura 2.14 – 2). Uma nova camada de resina líquida é "espalhada" (Figura 2.14 – 3). O excesso de resina é retirado com a passagem duma lâmina (Figura 2.14 – 4). O laser começa então por iluminar, e consequentemente solidificar, os suportes e de seguida a peça, percorrendo primeiro o contorno da geometria e varrendo posteriormente o seu interior (Figura 2.14 – 5). Tendo em conta o valor da profundidade de cura (C_d) para o contorno definido durante o seccionamento, é calculada automaticamente a velocidade de varrimento do laser (V_s) para a resina utilizada. Depois do contorno ter sido desenhado, o que demora apenas alguns segundos, o sistema começa a solidificar as áreas no interior da secção (internal hatch).

A seguir o elevador mergulha a plataforma no banho de polímero líquido e o raio laser cria a segunda camada de polímero sólido acima da primeira camada. O sistema automaticamente controla a exposição de maneira que cada camada adira à anterior. O processo é repetido sucessivas vezes até o polímero estar completo (Figura 2.14 – 6).

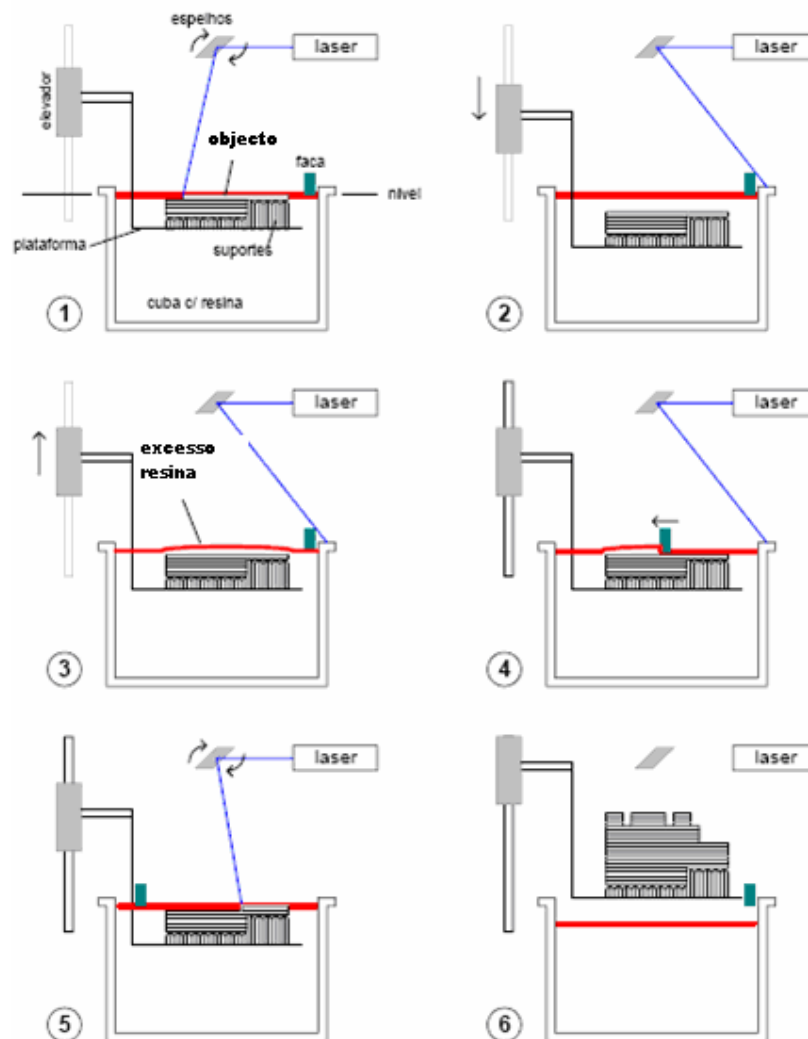


Figura 2.14 – Fases da construção

Existem várias formas de construir a trama do interior das peças, tais como o Tri-Hatch, o WEAVE e o STAR-Weave (STaggered hatch).

O Tri-Hatch cria uma trama constituída por linhas paralelas ao eixo x e linhas que fazem 60 e 120° em relação a este, formando uma estrutura de triângulos equiláteros. Estas linhas geralmente estão espaçadas $0.050'' = 1.25 \text{ mm}$ [2]. O problema é que surgem colunas verticais de resina não solidificada. Esta resina é polimerizada na fase de pós cura. A resina por curar é responsável por muitos empenos na fase da pós cura.

No WEAVE é criada por cada camada uma trama de linhas paralelas a y, seguida de linhas perpendiculares a estas e paralelas a x numa segunda passagem.

Na 1ª passagem é feito com que a profundidade de cura seja $0.001''$ inferior à espessura de camada (a).

$$C_d(1) = a - 0.001''$$

Equação 8.7 de [2]

Para isso o software tem de calcular $E_{\max}(1)$ para criar o respectivo $C_d(1)$

Sendo que $C_d(1)$ é calculado através da Equação 4.32 de [2]

$$C_d(1) = D_p \ln\left(\frac{E_{\max}(1)}{E_c}\right)$$

Ao fazer o 2º passe nos vectores x, idêntico ao 1º passe, a profundidade de cura nos pontos de intersecção após o 2º passe é a mesma que seria provocada por um passe com o dobro da energia.

$$C_d(2) = D_p \ln\left(\frac{2E_{\max}(1)}{E_c}\right)$$

Equação 8.3 de [2]

Que desdobrada

$$C_d(2) = D_p \ln(2) + D_p \ln\left(\frac{E_{\max}(1)}{E_c}\right) = D_p \ln(2) + C_d(1)$$

O que faz com que após o 2º passe haja um incremento na profundidade de cura de

$$\Delta C_d = D_p \ln(2) = 0.6931 D_p$$

Equação 8.6 de [2]

as linhas são espaçadas de:

$$h_s = L_w + 0.001''$$

Equação 8.8 de [2]

Sendo L_w definido por

$$L_w = 2W_0 \sqrt{\frac{C_D}{2D_p}}$$

Equação 4.40 de [2]

Este método deixa muito pouca resina por curar. Este é no momento o melhor método de construção do interior da maioria das peças [2].

O STAR-WEAVE é um melhoramento do WEAVE (Figura 2.15).

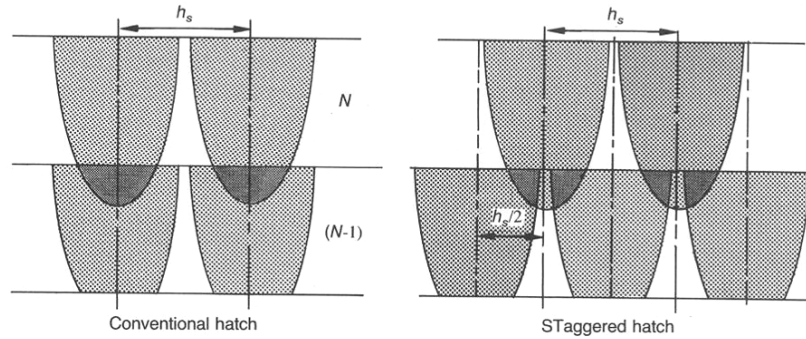


Figura 2.15 – Comparação entre WEAVE e o STAR-WEAVE [2]

Neste a trama de camadas sucessivas é desfasada de metade do espaçamento entre linhas. O desenvolvimento deste método deveu-se à tentativa de reduzir as tensões internas durante a construção e impedir o aparecimento e a propagação de fissuras.

O método da sequência alternada (**Alternate sequencing**), também é uma derivação do WEAVE, e que resulta de existirem 2 tipos diferentes de vectores (x e y) com 4 possíveis direcções e sentidos (da direita para a esquerda e de frente para trás). Combinando a 1ª com a 2ª passagem, podemos obter 8 combinações para cada camada.

A contracção das linhas da trama é responsável por muitas tensões internas que conduzem a empenos das peças. No WEAVE todos os vectores da trama estão fixos aos contornos da secção. Esta contracção deforma a trama e provoca forças de reacção nos bordos. Esta deformação dos bordos reduz a precisão das peças. A trama retraída (**Retracted hatch**), foi desenvolvido para que cada vector x ou y, apenas esteja fixo a um dos bordos, estando o outro a uma pequena distância do bordo $0.010''=0.25\text{mm}$ (Figura 2.16).

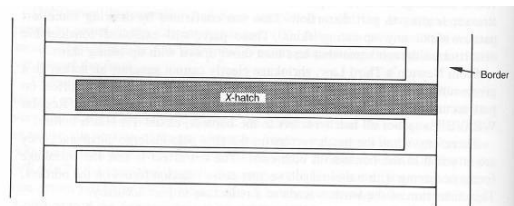


Figura 2.16 – Retracted hatch [2]

Quando a fase de construção termina, eleva-se a plataforma e remove-se o protótipo da sua superfície com uma espátula, de preferência de aço inoxidável, para permitir a limpeza da resina. Este processo é crítico, uma vez que peças com geometrias frágeis podem danificar-se.

O excesso de resina da peça e da plataforma devem ser retirados. A peça deve ir para uma máquina para ser retirado o excesso de resina com um solvente. Numa má lavagem, o solvente pode diluir a resina sem a retirar completamente da superfície da peça, fazendo com que o foto iniciador seja ineficaz para promover mais alguma polimerização. Nesta situação o filme residual de resina nunca irá curar completamente. Uma limpeza incompleta pode deixar resina por curar nos cantos, nos furos cegos ou em passagens estreitas. Além disso, estes restos de resina podem ser polimerizados, criando

erros na peça final. O excesso de exposição a alguns solventes podem provocar dilatação da peça e comprometer a precisão. De 1987 a 1990 o solvente mais utilizado era o álcool metílico (methyl) ou isopropílico (isopropyl). Segundo *Jacobs* [2], a exposição prolongada a estes solventes provocava dilatações nas peças. Outros solventes apresentam menores valores de dilatação como o Therm MS e o Propylene carbonate, mas os que apresentam melhores resultados são o Dipropileno glicol metil éter (DPM – Di-Propylene Glycol Monomethyl Ether) e o Tripropileno glicol metil éter (TPM – Tri-Propylene Glycol Monomethyl Ether) como se pode ver na Figura 2.17, retirada de [2].

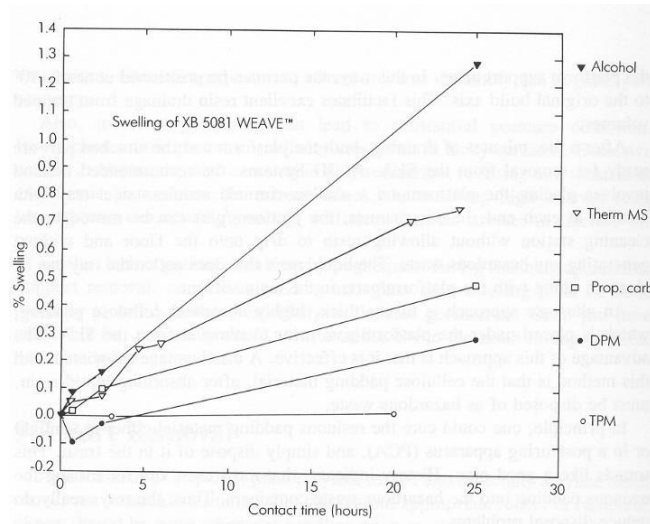


Figura 2.17 – Dilatação da resina XB 5081 com a exposição a diversos solventes [2]

A peça pode ser seca com um jacto de ar comprimido de baixa pressão. Este processo é útil na secagem de peças complexas. Nesta fase a peça está apenas parcialmente polimerizada (em verde).

A peça deve ser colocada numa câmara de UV para uma polimerização completa, visto que durante a construção uma parte da resina permaneceu na fase líquida.

Jacobs [2] estudou a eficiência volumétrica em função do comprimento de onda da luz UV durante a pós cura, para duas resinas XB 5139 e XB 5081-1. Depois de traçar para cada uma das resinas uma curva da D_p e E_c em função do comprimento de onda (λ) e definir a eficiência volumétrica (volume curado pela unidade da energia absorvida) da resina $\gamma_v(\lambda)$ como:

$$\gamma_v(\lambda) \equiv \frac{D_p}{E_c} \text{ [cm}^3\text{/J]}$$

Equação 9.1 de [2]

Vemos que para cada resina existe um valor óptimo para o comprimento de onda da luz UV, como ilustrado na Figura 2.18.

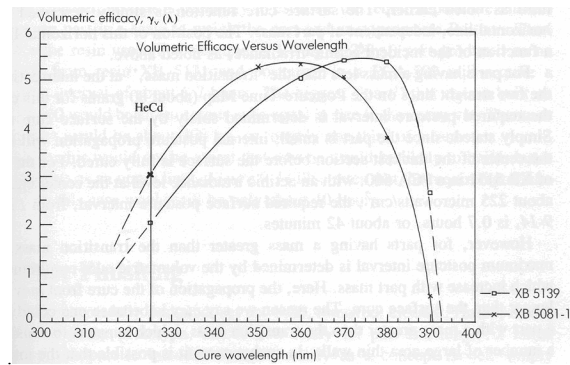


Figura 2.18– Eficiência volumétrica em função do comprimento de onda [2]

Muitas peças podem ficar completamente polimerizadas em 1 ou 2 horas, enquanto que peças muito compridas podem necessitar mais de 10 horas [2]. O tempo de cura de uma peça é função da raiz cúbica da sua massa. A Figura 2.19 mostra uma linha recta que representa o tempo de cura de uma resina XB 5131 em função da sua massa. A linha recta representa a cura da superfície que não depende da sua massa.

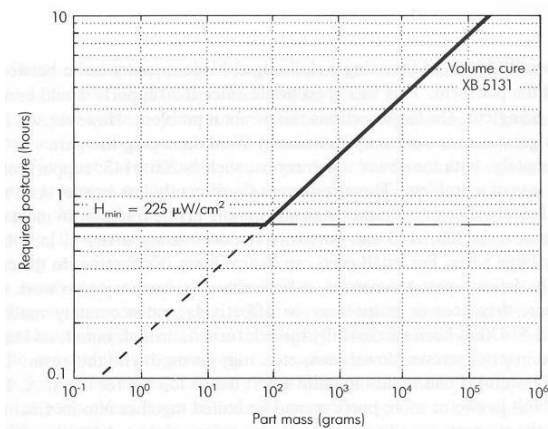


Figura 2.19 – Tempo de cura em função da massa [2]

Este processo de polimerização é essencial no processo da estereolitografia, no entanto pode afectar a precisão das peças.

Wang et al [14] estudaram a contracção processo de polimerização (cura) e desenvolveram equações empíricas para a contracção na direcção do varrimento e na direcção transversal. Alguns factores como, a potencia do laser, a espessura de camada e o tempo de cura, podem influenciar a contracção que ocorre no processo de polimerização (cura) segundo a direcção do varrimento e na transversal.

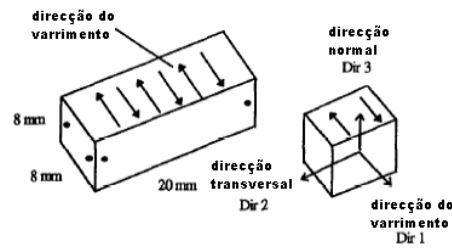


Figura 2.20 – Modelo utilizado em [14]

A contracção é dada por

$$S(\%) = \left(\frac{D_1 - D_p}{D_1} \right) \times 100\%$$

Em que, D_1 é a distância entre 2 pontos antes da polimerização e D_p é a mesma distância após a polimerização

Na direcção do varrimento:

$$S = 4.7814L^{0.617} \left(\frac{1}{P} \right)^{0.2386} T^{0.1646}$$

Na direcção transversal:

$$S = 0.2267L^{0.4527} \left(\frac{1}{P} \right)^{0.5771} T^{0.2132}$$

Em que;

P – Potência do laser (mW)

T – Tempo de cura (h)

L – Espessura de camada (mm)

Algumas resinas podem ser submetidas a um tratamento térmico, ligeiramente acima da sua temperatura de transição vítrea, após a polimerização por UV [34], com a finalidade de aumentar o número de ligações cruzadas entre as moléculas. Estas ligações cruzadas acontecem entre moléculas que não tiveram contacto entre si durante a construção e a polimerização. O aumento da temperatura aumenta a mobilidade dos radicais livres favorecendo as ligações cruzadas entre si. O aumento do número de ligações cruzadas conduz a maior densidade, rigidez e resistência à degradação.

Após a polimerização e o tratamento térmico teremos o protótipo já com a resistência final que lhe é característica. Posteriormente, são removidos os suportes da peça num processo chamado de descubicagem. O modelo final obtido, já apresenta uma qualidade superficial elevada. No entanto, caso seja insuficiente, podem realizar-se algumas

operações suplementares de acabamento, tais como: lixamento, polimento, pintura e revestimentos.

Os protótipos fabricados por esta tecnologia apresentam um aspecto de plástico translúcido, com uma elevada precisão, rigor dimensional e um elevado grau de detalhe e pormenor.

2.3.2 Equipamentos

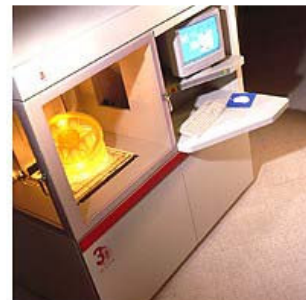
Os equipamentos para o fabrico de peças por estereolitografia mais vulgares são da 3D Systems. Também existem no mercado equipamentos da Sony Manufacturing Systems Corporation, da Fockeleund & Schwarze e da CMET.



SLA Viper 0404



SLA 5000



SLA7000

Figura 2.21 – Máquinas da 3DSystems [15]



SCS6000



SCS8000



SCS800D



SCS9000D

Figura 2.22 – Máquinas da Sony [16]



FS Realizer

Figura 2.23 – Máquina Fockeleund & Schwarze [17]



Rapid Meister 3000



Rapid Meister 6000

Figura 2.24 – Máquinas da CMET [18]

Para aplicações específicas na área da ourivesaria existem equipamentos da MEIKO.



Figura 2.25 – Anel [19]



Figura 2.26 – MEIKO CV-810 [19]



Figura 2.27 – MEIKO LC-510 [19]



Figura 2.28 – MEIKO LCV-700 [19]

A PROFORM desenvolveu em colaboração com a École Polytechnique Fédéral de Lousanne (EPFL) uma máquina de micro estereolitografia. Esta tecnologia permite a construção de peças com a resolução de $10\mu\text{m}$. Esta máquina pode construir peças com a dimensão máxima de $5 \times 7 \times 30 \text{ mm}^3$.



Figura 2.29 – Máquina de Micro Estereolitografia da EPFL [20]

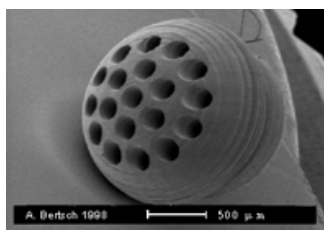


Figura 2.30 – Peça de Micro Estereolitografia [20]

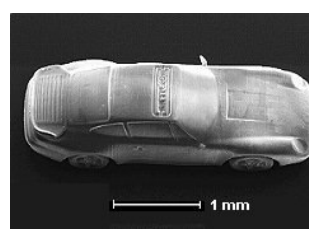


Figura 2.31 – Peça de Micro Estereolitografia [21]

2.3.3 Materiais para Estereolitografia

Existe uma vasta gama de materiais para estereolitografia. Alguns exemplos de fabricantes e materiais estão indicados na Tabela 2-3.

Tabela 2-3 – Materiais de Estereolitografia

Fabricante	Denominação
3D Systems	Accura Si 10
	Accura Si 20
	Accura Si 30
	Accura Si 40
	Accura Amethyst (Amethyst "Nd" só para modelo Viper)
	AccuDur 100
DSM	AccuGen "Nd" (AccuGen "Ar" ou "Hc" só para modelos 250 e 500)
	Somos Prototool 20L
	Somos ProtoTherm 12100 (12100; 12110; 12120)
	Somos 9100 (9100; 9110; 9120)
	Somos 9920
	Somos 8100 (8100; 8110; 8120)
	Somos 7100
	Somos 10100 (10100; 10110; 10120) water clear
	Somos 11100 (11100; 11110; 11120) water shed
	Somos 12100 (12100; 12110; 12120)

Vantico	Renshape SL 7560 Renshape SL 7580 Renshape SL 5220 Renshape Express 2000 XD 4532 XD 4533
CibaGeigy	Cibatoool SL5170

2.3.4 Potencialidades da Estereolitografia

Kataria e Rosen [22], mostraram as possibilidades da estereolitografia em construir montagens funcionais e mecanismos, todos em resina, de maneira a que as várias peças não se fundam entre si e que os suportes que ficam entre os componentes possam ser retirados (Figura 2.32 e Figura 2.33).

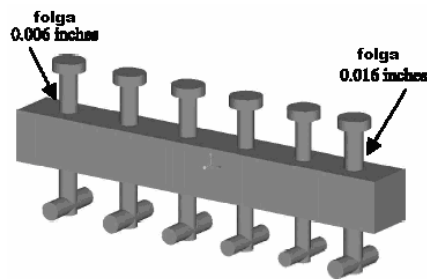


Figura 2.32 – Peça para deslizamento vertical e de torção para secção circular [22]

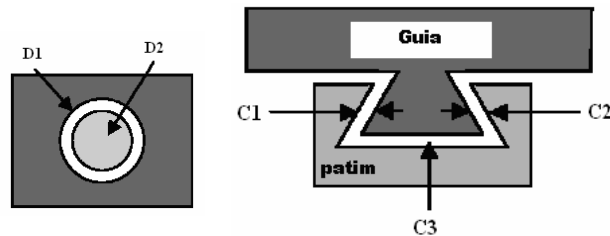


Figura 2.33 – Deslizamento secção prismática [22]

Na Tabela 2-4 são apresentados as folgas mínimas que permitem o movimento entre as 2 peças, para a secção circular (movimento na vertical e de torção) e prismática, para as resinas Somos 7100 e Vantico SL 7510.

Tabela 2-4 – Folgas mínimas secção circular (movimento na vertical e de torção) e prismática [22]

Tipo de Junta	Modelo SLA	Resina	Pot. laser (mW)	Folga mínima necessária
Cilíndrica de deslizamento vertical	SLA-250	DSM SOMOS 7110	21	D1-D2=0.008in= 0.2032mm
	SLA-3500	Vantico SL-7510	225	D1-D2=0.014in= 0.3556mm
Cilíndrica de deslizamento de torção	SLA-250	DSM SOMOS 7110	21	D1-D2= 0.010in=0.2540mm
	SLA-3500	Vantico SL-7510	225	D1-D2=0.016in=0.4064
Prismática de deslizamento horizontal	SLA-250	DSM SOMOS 7110	21	C1=C2=C3=0.008in= 0.2032mm
	SLA-3500	Vantico SL-7510	225	C1=C2=C3=0.008in= 0.2032mm

Outra possibilidade descrita por *Kataria e Rosen* [22] é a construção de peças de estereolitografia que possuam insertos de materiais diferentes das resinas de estereolitografia. Estes insertos geralmente têm de ser colocados durante a construção.

Um dos problemas com a colocação do inserto é a sombra que provoca, ao não permitir que o laser incida em algumas áreas (Figura 2.34).

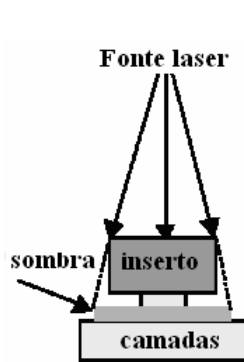


Figura 2.34 – Sombra do laser [22]

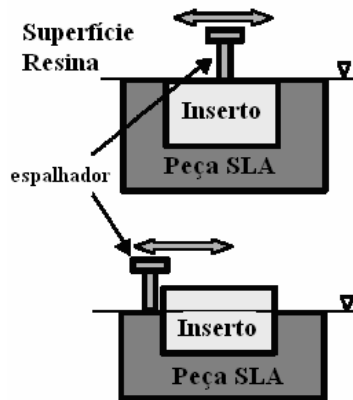


Figura 2.35 – Espalhamento da resina [22]



Figura 2.36 – Suportes na construção da cavidade [22]

Outro problema, é não permitir o espalhamento da resina, durante a construção com o inserto, o que obriga a que este só possa ser colocado quando exista uma cavidade que possa alojar o inserto (Figura 2.35).

No entanto, a construção da cavidade pode obrigar à colocação de suportes, que têm de ser retirados antes de colocar o inserto (Figura 2.36).

As folgas mínimas que permitem a colocação de insertos para secção circular e rectangular (Figura 2.37) estão indicadas na Tabela 2-5.

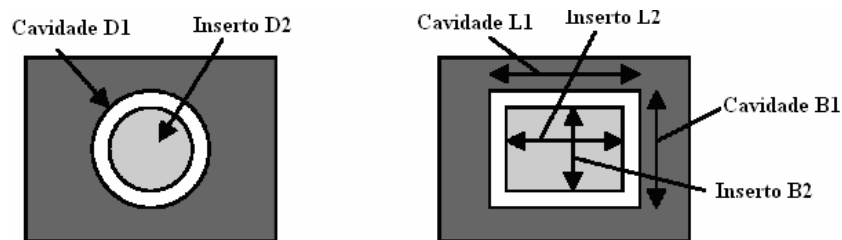


Figura 2.37 – Folgas para colocação dos insertos [22]

Tabela 2-5 – Folgas mínimas para insertos secção circular e rectangular [22]

Secção Inserto	Ajustamento	Dimensões críticas
Cilíndrica	Folga	$D1-D2=0.006\text{in}=0.1524\text{mm}$
	Transição	$D1-D2=0.000$
	Interferência	$D1-D2=-0.006\text{in}=-0.1524\text{mm}$
Rectangular	Folga	$L1-L2=B1-B2=0.006\text{in}=0.1524\text{mm}$
	Transição	$L1-L2=B1-B2=0.000$
	Interferência	$L1-L2=B1-B2=-0.006\text{in}=-0.1524\text{mm}$

A empresa Design Prototyping Technologies oferece no seu Website a possibilidade de fabricar peças de estereolitografia com insertos metálicos (Figura 2.38).

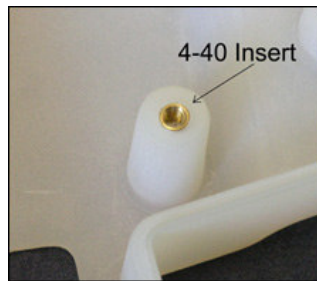


Figura 2.38 – Peça de estereolitografia com inserto metálico roscado da Design Prototyping Technologies [23]

Estes insertos podem ser roscados no sistema imperial ou métrico. Mas, ao contrário do caso apresentado anteriormente, estes insertos não são colocados na fase da construção, mas sim durante o acabamento.

2.3.5 Outros Equipamentos

O facto de a construção ser por camadas finitas (normalmente na ordem dos 0.1mm) na direcção do eixo z, provoca erros de degrau. À medida que a espessura de camada diminui, o objecto aproxima-se mais da forma pretendida e a qualidade da superfície aumenta. Dependendo da espessura de camada e da inclinação das superfícies em relação ao feixe do laser, estas podem ser mais ou menos planas. Principalmente se as superfícies não forem paralelas ou perpendiculares ao laser. Se forem curvas este efeito é muito mais acentuado, sendo necessário proceder a operações de acabamento como granalhagem por jacto de areia ou água, polimento, maquinagem, pintura ou deposição. Na literatura são propostas técnicas para reduzir os erros baseados na melhor orientação para a construção [13]. Uma nova solução é baseada na alteração das máquinas de estereolitografia de maneira a que possam construir camadas inclinadas.

2.3.5.1 Máquina com plataforma Rotativa

Holzer et al [24], propõem uma máquina que tenha movimento de rotação no eixo do x e y e movimento de translação ao longo do eixo do z (Figura 2.39).

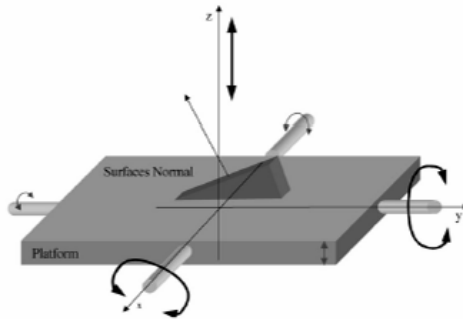


Figura 2.39 – Plataforma com rotação em x e y e com movimento linear em z [24]

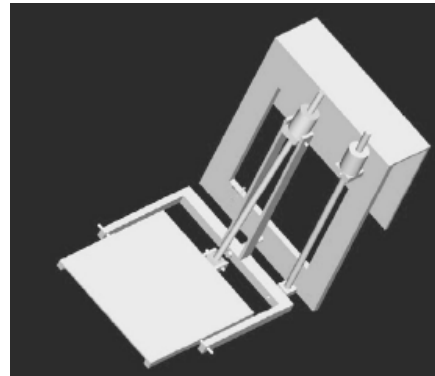


Figura 2.40 – Solução construtiva [24]

A solução construtiva está representada na Figura 2.40.

2.3.5.2 Estereolitografia com luz UV convencional

Maoliang *et al* [25] apresentam um novo método para estereolitografia chamado Compact Prototyping System (CPS), desenvolvido no Institute of Advanced Manufacturing Technology (IAMT) da Universidade de Xi'an Jiaotong, China (Figura 2.41).



Figura 2.41 – Máquina Compact Prototyping System (CPS) [25]

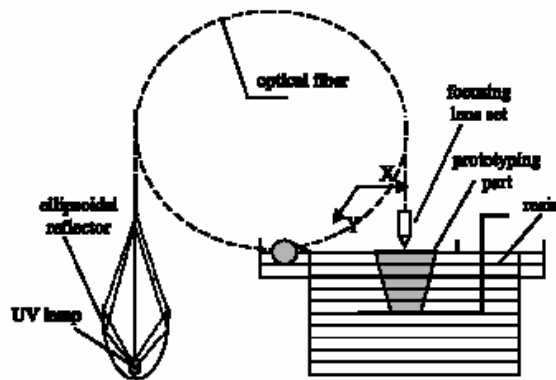


Figura 2.42 – Esquema de funcionamento da CPS [25]

Esta máquina funciona com o mesmo princípio da estereolitografia, mas o laser é substituído por uma lâmpada de UV. Comparada com a estereolitografia de laser este é um processo mais económico para a produção de protótipos.

O seu princípio de funcionamento assenta numa luz UV produzida pela lâmpada é reflectida por espelhos elípticos e conduzida por fibra óptica até às lentes (Figura 2.42). O conjunto de lentes pode movimentar-se segundo x e y. Depois de focalizada esta luz

de alta intensidade incide na superfície da resina. Comparado com a estereolitografia laser o feixe de luz apresenta maior dispersão e menos energia, o que resulta no fabrico de peças com diferentes características das produzidas por laser.

A profundidade e a largura duma linha polimerizada dependem da potência da luz e do tempo de exposição fixado pela velocidade do varrimento. Em comparação com o laser, esta apresenta menor profundidade mas maior largura, pois a intensidade de energia é menor mas a dispersão é maior.

2.3.5.3 Estereolitografia para grandes dimensões

A Materialise desenvolveu uma tecnologia para a estereolitografia chamada de Mammoth. Estas máquinas vão de encontro à procura de equipamentos capazes de construir protótipos de grandes dimensões numa única peça. Estes equipamentos podem construir peças até 2100x650x780mm. Utilizam as resinas Poly1500 e Tusk2700. Nas Figura 2.43 e Figura 2.45 é apresentada a construção da estátua de Kouros com 1.86m, que consumiu 16 kg de resina e depois de removidos os suportes pesa 11kg.

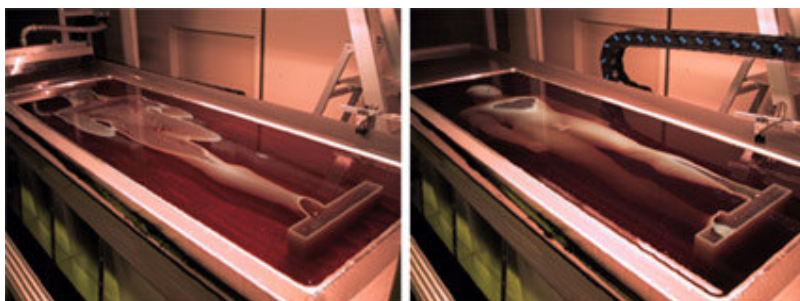


Figura 2.43 – Construção na máquina Materialise Mammoth após 24horas (esq.) e após 86h (dir.) [26]



Figura 2.44 – Estátua de Kouros [26]

2.3.6 Novas Resinas

A pouca resistência de peças de prototipagem rápida produzida por estereolitografia, tem sido um problema quando estas são sujeitas a esforços. As peças durante a polimerização sofrem contracções e distorções. Este efeito é mais acentuado durante a fase da pós cura. A pouca condutibilidade térmica das resinas também é crítica quando se pretende utilizar estas peças como ferramentas de Rapid Tooling em moldação por injeção. Nos últimos anos têm sido feitos estudos para melhorar estas propriedades, com a utilização de fibras e de materiais cerâmicos.

2.3.6.1 Resinas reforçadas com fibras

Cheah et al [27] apresentam um estudo da variação das propriedades mecânicas com a utilização de fibras. Os autores concluem que a utilização de fibras de vidro curtas melhoram as propriedades mecânicas dos protótipos fabricados por estereolitografia. A resistência das peças é função da quantidade de fibras, da sua orientação, do seu comprimento, da potência do laser e da espessura da camada.

Na Figura 2.45 e Figura 2.46 é mostrada a variação da tensão de rotura e do alongamento com a % de fibras com um comprimento de 1.6mm e com um diâmetro de 15.8 μ m.

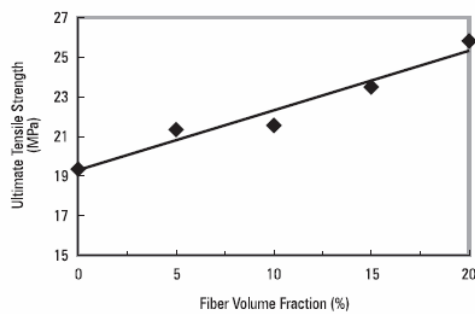


Figura 2.45 – Variação da tensão de rotura com % de fibras [27]

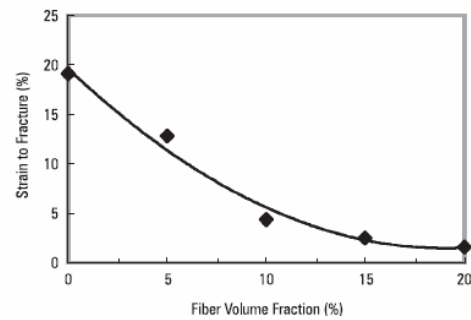


Figura 2.46 – Variação do alongamento com % de fibras [27]

A utilização de maiores quantidades de fibras irá conduzir a uma melhoria das propriedades mecânicas. No entanto, a viscosidade da resina seria mais alta, o que dificultaria a deposição de camadas finas da mistura da resina e das fibras, o que tornaria o processo impraticável.

Os autores mostram que a contração Longitudinal (L) quando se usam potências baixas é menor nas resinas reforçadas do que nas sem reforço, tanto para espessuras de camada de 150 como de 300 μ m (Figura 2.47 e Figura 2.48).

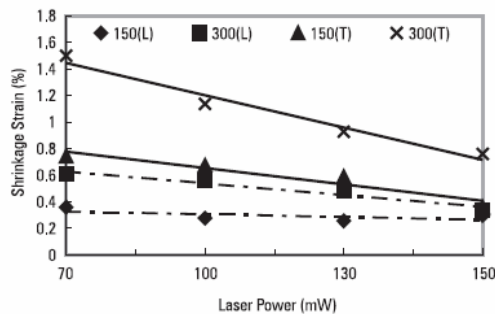


Figura 2.47 – Contração longitudinal (L) e transversal (T) em resinas sem reforço com espessuras de camada de 150 e 300 μ m [27]

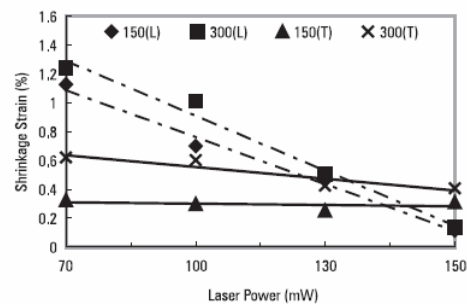


Figura 2.48 – Contração longitudinal (L) e transversal (T) em resinas com reforço com espessuras de camada de 150 e 300 μ m [27]

Isto deve-se ao facto de as fibras serem mais opacas à penetração do laser, o que faz com que quando se usam potências baixas, haja zonas parcialmente polimerizadas em cada camada.

2.3.6.2 Resinas com materiais cerâmicos

A prototipagem rápida pode ser utilizada para a construção de peças cerâmicas, quando estas necessitam de realizar testes funcionais. *Hinczewski et al* [28] estudaram a utilização da estereolitografia para o fabrico directo de peças em verde (green parts). Nesse estudo foi utilizada uma suspensão de materiais cerâmicos numa resina foto polimerizável. Esta peça em verde, que é um aglomerado de resina e cerâmico, tem de sofrer um tratamento térmico a 240 °C durante 3h para remover a fase polimérica e posteriormente ser sinterizada a 1580°C durante 3 h.

Esta suspensão de partículas usada na estereolitografia em substituição da resina tem cerca de 53% (em volume) de partículas cerâmicas dispersas numa resina foto polimerizável, onde é dissolvido um foto inicializador. Esta mistura deve ser a mais homogénea possível, pelo que é usado um dispersante, para promover uma boa distribuição das partículas na resina. A viscosidade deve ser mantida o mais baixa possível, para permitir a construção de camadas finas, pelo que é necessária a adição de diluente na mistura. Na Figura 2.49 e Figura 2.50, os autores mostram os efeitos da adição de dispersante e diluente na viscosidade da mistura [28].

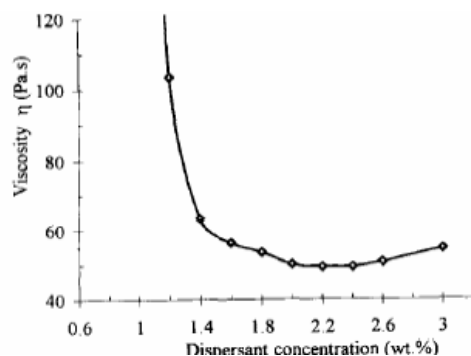


Figura 2.49 – Viscosidade ($\dot{\gamma} = 100\text{s}^{-1}$, 20°C) da suspensão de alumina (80 % em peso) para diferentes concentrações de dispersante [28]

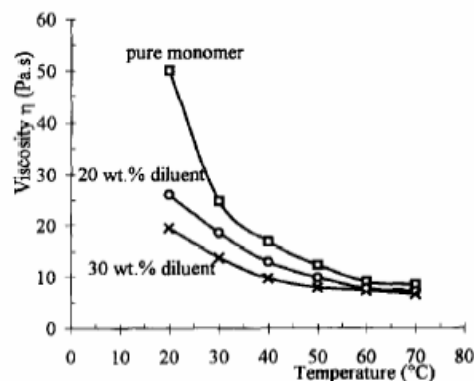


Figura 2.50 – Viscosidade ($\dot{\gamma} = 100\text{s}^{-1}$, 20°C) da suspensão de alumina (80 % em peso) em relação à temperatura para diferentes concentrações de diluente na resina 0 (\square), 20 (O) e 30 wt% (x) [28]

2.3.6.3 Resinas elastômeros

A DSM SOMOS vai introduzir no mercado uma resina elastômero (Figura 2.51). A resina Somos ULM 17220 tem um módulo de elasticidade muito baixo e um alongamento superior a 100%, o que a torna adequada para fabricar protótipos de borracha.



Figura 2.51 – Peça fabricada com resina SOMOS ULM 17220

2.3.6.4 Resinas resistentes ao fogo

A resina SOMOS FR 16120 foi introduzida este ano no mercado e é a primeira resina comercial com retardador de chama (Figura 2.52). Esta resina em testes de laboratório revelou-se como um material auto extingüível.



Figura 2.52 – Resina Somos FR 16120

2.3.6.5 Resinas resistentes à temperatura

A resina SOMOS Prototherm 12120 produz peças com boa resistência mecânica e é resistente a altas temperaturas (Figura 2.53). Esta resina tem uma temperatura de transição vítrea de 74°C, mas quando tratada termicamente esta temperatura sobe para os 111°C. Quando tratada termicamente apresenta uma cor laranja avermelhada



Figura 2.53 – Peça fabricada com resina Somos 12120

2.3.6.6 Resinas compósitas

A resina SOMOS Prototool 20L foi a primeira resina compósita desenvolvida para máquinas convencionais de estereolitografia (Figura 2.54). No entanto, esta resina necessita de um equipamento de mistura para manter as partículas em suspensão.



Figura 2.54 – Peça fabricada com resina Somos Prototool 20L

A resina Accura Bluestone da 3D Systems é uma resina nano-compósita, que na sua formulação comercial não necessita de qualquer mistura (Figura 2.55). Esta resina pode ser processada como as resinas tradicionais de estereolitografia. O fabricante afirma que esta resina pode ser utilizada até temperaturas de 250°C.



Figura 2.55 – Peça da Renault F1 Team fabricada com Accura Bluestone

A DSM Somos apresenta a NanoForm 15120, que é uma resina compósita de estereolitografia que incorpora nano-partículas cerâmicas para melhorar a sua rigidez e resistência a elevadas temperaturas (Figura 2.56). Esta resina apresenta propriedades idênticas aos materiais de FDM e SLS. Segundo o fabricante, este material é uma boa alternativa aos materiais de SLS disponíveis actualmente. A incorporação destas nano-partículas cerâmicas envolvidas numa matriz termoendurecida permite um elevado módulo de elasticidade superior a 5000MPa, uma excelente estabilidade dimensional, baixa contracção e baixo coeficiente dilatação térmica.

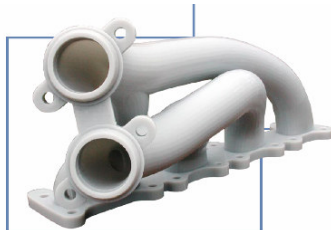


Figura 2.56 – Peça em resina SOMOS NanoForm 15120

2.4 Utilização de insertos sólidos – ACES (Accurate Clear Epoxy Solid)

A técnica que utiliza blocos sólidos produzidos por estereolitografia é denominada por ACES (Accurate Clear Epoxy Solid). As ferramentas construídas por este processo têm problemas de transferência de calor, pois as resinas utilizadas apresentam um valor da condutibilidade térmica de 0.18 W/mK [6] (alumínio 200 W/mK e o aço 60 W/mK), o que é cerca de 1000 vezes menor que o alumínio e 300 vezes menor que o aço). Esta característica obriga a ciclos longos. Devido ao grande volume de construção em estereolitografia este processo é muito demorado e caro.

2.4.1 Insertos com canal de refrigeração incorporado

Estes insertos são uma variante dos insertos sólidos. Como o inserto é construído por camadas, podemos construir canais de refrigeração com a forma e dimensões pretendidas (**conformal cooling**) (Figura 2.57 e Figura 2.58).

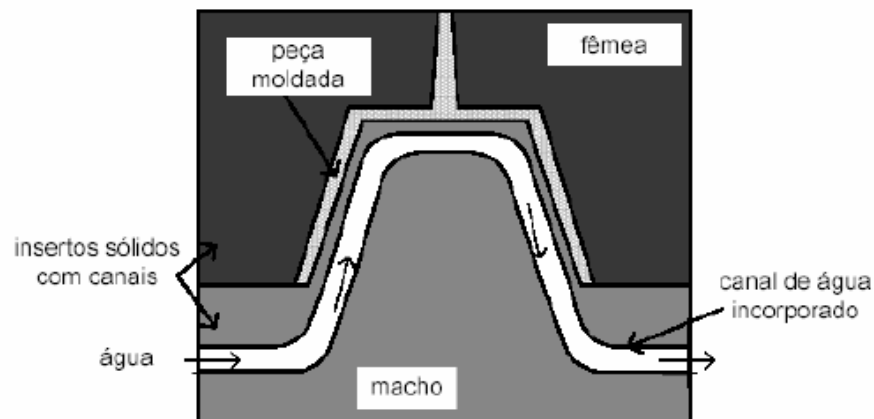


Figura 2.57 – Representação esquemática de um inserto conformal cooling [30]

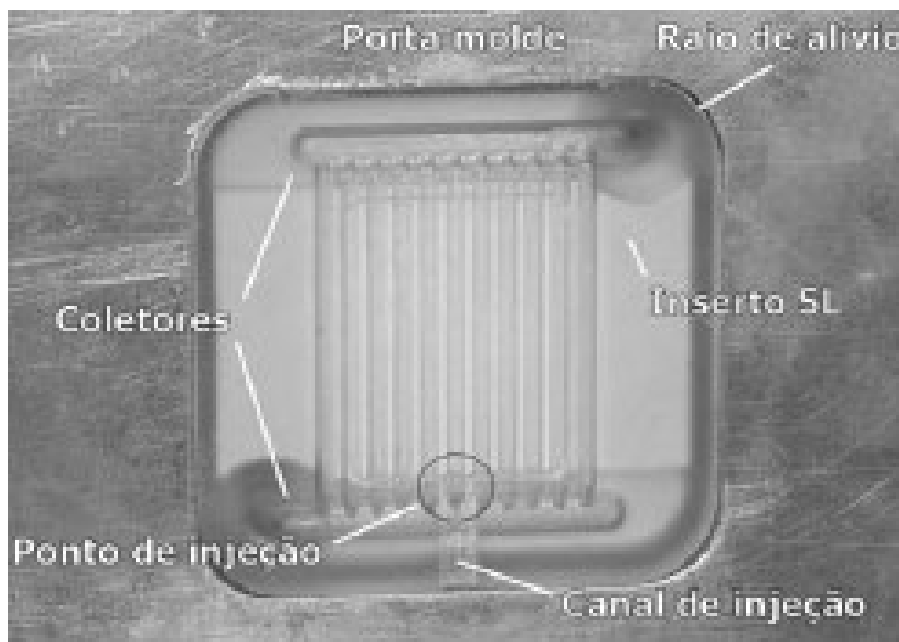


Figura 2.58 – Inserto conformal cooling [31]

Desta forma, a refrigeração pode ser otimizada, de forma a termos um arrefecimento da peça mais uniforme. Podemos utilizar softwares como o Moldex ou o Moldflow, para diminuirmos a variação das temperaturas na bucha e cavidade e para a colocação dos canais de refrigeração. Esta diferença de temperatura não deve ultrapassar os 10 °C [29]. O fluido de arrefecimento deve ter o mesmo sentido do fluxo (fluxos paralelos). Isto é, na zona em que o fluxo está a temperaturas mais elevadas, o fluido deve estar mais frio.

A construção dos canais no próprio inserto reduz a resistência mecânica durante a injeção, pois os canais devem estar o mais próximos da superfície para otimizar a transferência de calor. A circulação de água no inserto pode provocar deformação deste devido à absorção da água pela resina. Também pode haver fugas de água pelas ligações.

2.4.2 Insertos sólidos com canal de refrigeração incorporado auto pressurizados

Uma variante do conformal cooling é a utilização de canais incorporados auto pressurizados. Este sistema utiliza válvulas na entrada e saída dos canais de refrigeração, que são fechadas durante a injeção e pressurização e abertas durante a refrigeração (Figura 2.59). A água é um fluido incompressível, o que permite que o postigo não se deforme sob a acção da pressão.

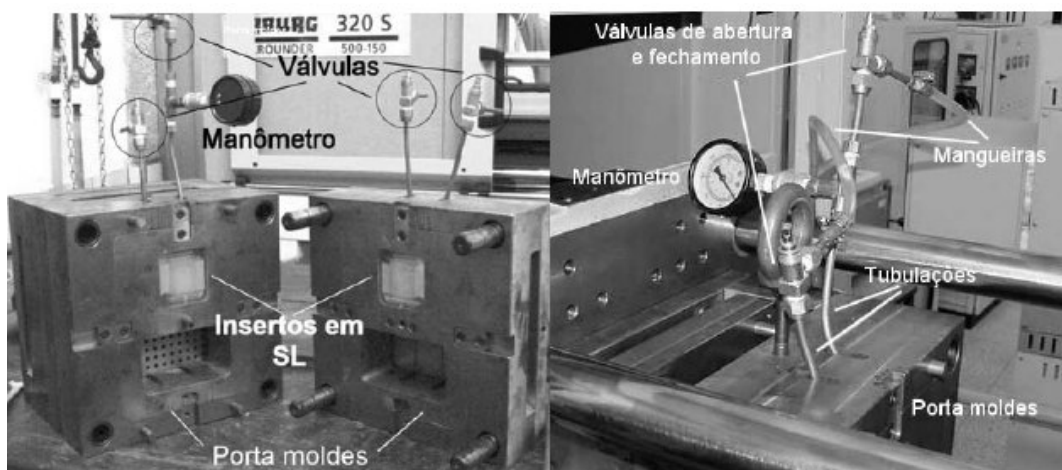


Figura 2.59 – Conjunto porta moldes, válvulas para controlo de fluxo de fluido refrigerante, mangueira, manómetros e inserts [31]

2.5 Direct AIM

Quanto à utilização directa da estereolitografia em ferramentas de fabrico rápido, estas podem ser em forma de casca ou maciças. Em casca é denominada de Direct AIM (Direct Aces Injection Moulding) desenvolvido pelo Institute for Plastics Innovation em conjunto com a 3D Systems. Esta técnica consiste em construir uma casca de pequena espessura construída por estereolitografia, e o seu interior é preenchido com ligas de baixo ponto de fusão ou compostos epoxídicos e alumínio (Figura 2.60).



Figura 2.60 – Cascas de direct AIM preenchidas com resina e pós de alumínio [32]

O arrefecimento é conseguido pela circulação de água em tubos de cobre colocados no inserto. Este processo apresenta grandes limitações na quantidade de peças obtidas. A pouca condutibilidade térmica destas resinas diminui a vida do molde, pois a resina perde resistência mecânica quando sujeita a elevadas temperaturas, principalmente depois de ultrapassada a temperatura de transição vítrea.

2.5.1 Espessura da casca

Devido à baixa condutibilidade térmica da resina, a espessura da casca é um dos factores que mais afecta o comportamento térmico do inserto. Por um lado a casca deve ter a espessura o mais reduzida possível, de forma a melhorar a transferência de calor para o material de enchimento, mas por outro lado, uma espessura muito reduzida pode provocar a sua deformação quando estiver a ser enchido com ligas metálicas de baixo ponto de fusão, devido à temperatura a que está a ser vazada e ao seu peso.

2.5.2 Material de enchimento

A casca pode ser preenchida com ligas metálicas de baixo ponto de fusão, resina com pós de alumínio ou resina com pós de carbono.

Saurkar et al [29] estudaram o arrefecimento em insertos com enchimentos de ligas de baixo ponto de fusão e com resinas e concluíram que, os insertos com enchimentos com de ligas metálicas de baixo ponto de fusão arrefecem mais rapidamente do que os fundos de resina. A adição de pós de alumínio (39%) não melhora substancialmente a condutibilidade térmica do enchimento, enquanto que a adição de pós de carbono (12%) já melhora a transferência de calor do enchimento. A grande vantagem dos enchimentos de resina, é que podemos utilizar cascas mais finas.

2.5.3 Geometria

O número de peças obtidas com sucesso nos moldes de estereolitografia depende muito da geometria da peça. Os ângulos de saída e a forma dos ataques são aspectos muito relevantes na duração dos moldes. Se para os moldes convencionais de aço, as limitações geométricas das peças já estão estabelecidas, o mesmo tem de ser estudado para as ferramentas produzidas por estereolitografia, para que este possa ser um processo fiável. À medida que o ângulo de saída aumenta melhora a extracção da peça. O polimento deficiente, a não aplicação de desmoldante e arrefecimento insuficiente diminuem a vida da ferramenta. A utilização de um ataque em lâmina aumenta a área do canal e diminui a velocidade do fluxo na zona do ataque, o que faz com que a duração do molde seja maior. *Palmer e Colton* [33] estudaram o número de peças produzidas em

função do ângulo de saída dos entalhes em ataques em ponto e em lâmina com é mostrado na Figura 2.61 e na Figura 2.62.

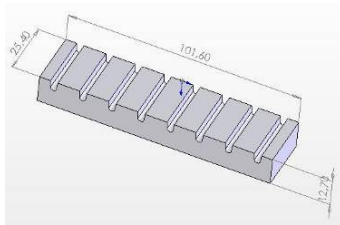


Figura 2.61 – Peça de teste adaptada de [33]

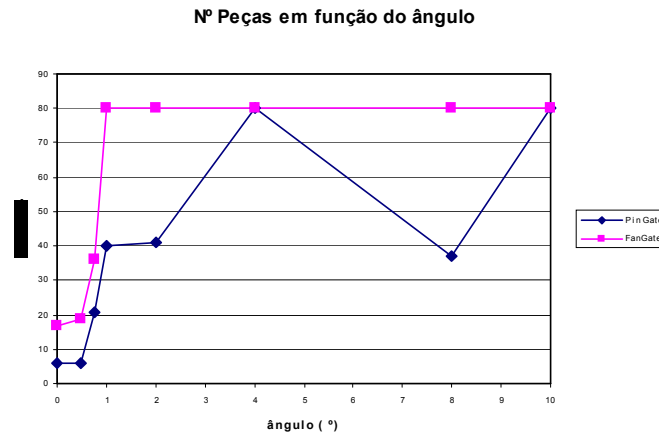


Figura 2.62 – Nº de peças em função do ângulo de saída dos entalhes para um ataque em lâmina (fan gate) e ponto (pin gate) adaptado de [33]

Ao contrário dos moldes convencionais de aço, o aumento do ângulo de saída nem sempre reduz a força de extracção.

2.5.4 Injecção

Durante a injecção a resina é submetida a vários ciclos de aquecimento e arrefecimento. Estes ciclos não contribuem mais para a falha dos moldes de estereolitografia que o tratamento térmico [34]. A falha destes moldes deve-se mais a picos de temperatura do que propriamente a alterações das propriedades mecânicas ao longo do tempo. O processo da injecção pode provocar a rotura por corte ou por flexão em certas geometrias da ferramenta (Figura 2.63).

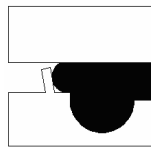


Figura 2.63 – Rompimento de geometrias durante a injecção

Palmer e Colton [35] estudaram o tipo de falhas em geometrias com diferentes alturas e larguras. Definiram as várias alturas e larguras como razões em relação à espessura. Cada geometria é representada por 2 índices, o primeiro é a razão de altura e o segundo a razão de largura (Figura 2.64).

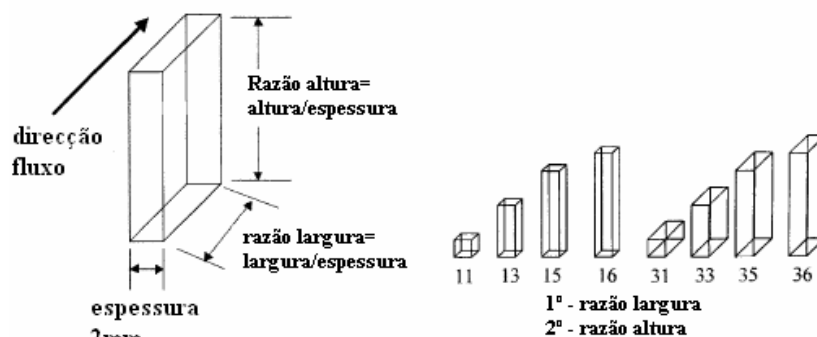


Figura 2.64 – Razão entre a largura e espessura e entre a altura e espessura [35]

Na Tabela 2-6 está representada a vida dos insertos em 3 experiências para as várias razões de altura e largura. Quando a falha ocorreu devido ao fluxo está representado “(F)” e quando ocorreu devido ao arrancamento de fragmentos “(C)”.

Tabela 2-6 – Vida do molde para as várias razões de largura e espessura [35]

Razão largura/razão altura	1	2	3	média
1/1	44 (C)	100	53 (C)	65.7
1/3	6	4	3	4.3
1/9	1 (F)	1 (F)	1 (F)	1.0
3/1	36	46	21 (C)	34.3
3/3	2	3	3	4.0
3/9	3 (F)	3	2 (F)	2.7
9/1	100	100	100	100
9/3	3	6	5	4.7
9/9	1 (F)	4	2 (F)	2.3

2.5.5 Pressão

Uma das variáveis mais importantes neste processo é a pressão nas cavidades moldantes. O material termoplástico deve ser injectado à menor pressão necessária para encher a peça. A 2ª pressão pode ser melhor controlada, aumentando a vida da ferramenta produzida por estereolitografia e produzindo peças com melhor estabilidade dimensional. Deve haver saída de gases pela linha de partição e pelos extractores caso existam, contribuindo também para uma redução da pressão na cavidade.

2.5.6 Arrefecimento

É importante que haja um arrefecimento rápido da resina até ao ponto em que a peça possa ser retirada. A peça deve ser retirada quando estiver ligeiramente acima da sua temperatura de transição vítrea. A peça é mais flexível a esta temperatura, o que é importante para que a casca não se deteriore durante a extracção. A danificação da ferramenta ocorre geralmente na extracção da peça. Com o arrefecimento a peça tende a contrair sob a ferramenta e a dificultar a sua extracção. Nesta situação a sua resistência mecânica da ferramenta na está diminuída pelo o aumento da temperatura.

2.5.7 Força de extracção

Cedorge e Colton [36] estudaram o efeito da rugosidade, do ângulo de saída e da espessura da camada na força de extracção. Segundo os autores, o aumento do ângulo e da espessura de camada provocam um aumento da rugosidade devido ao efeito de degrau (Figura 2.66).



Figura 2.65 – Efeito de degrau [2]

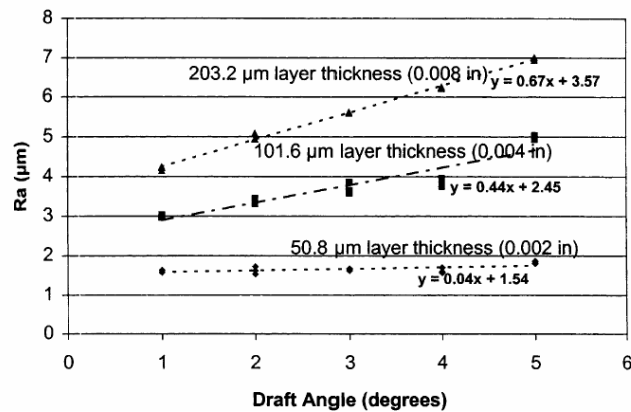


Figura 2.66 – Rugosidade em função do ângulo e da espessura da camada [36]

A rugosidade é um factor importante na força de extracção. No entanto, o aumento do ângulo de saída e da rugosidade, não tem o mesmo efeito para todas as espessuras de camada. Com uma espessura de 51µm (Figura 2.67), o aumento do ângulo provoca a redução da força de extracção. Este resultado é idêntico no caso dos moldes convencionais de aço.

Já no caso de uma espessura de 203µm (Figura 2.68), o aumento até aos 3° provoca uma subida da força de extracção, mantendo-se depois constante. Donde se conclui que

prevalece o efeito do aumento da rugosidade sob o aumento do ângulo até aos 3°, equilibrando-se estes efeitos para valores superiores do ângulo.

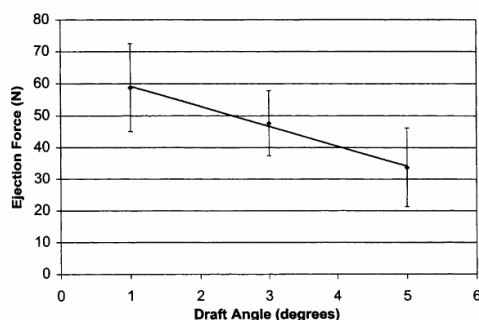


Figura 2.67 – Força de extracção em função do ângulo de saída para uma espessura de 51 µm [36]

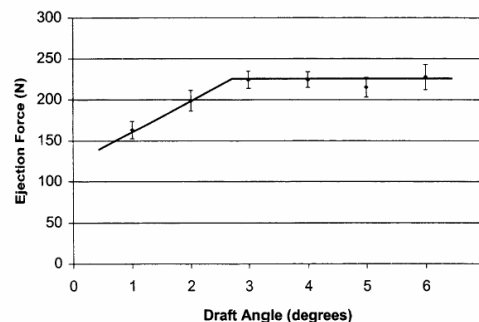


Figura 2.68 – Força de extracção em função do ângulo de saída para uma espessura de 203 µm [36]

Colton [37] também estudou o efeito da pós cura na força de extracção em peças construídas com a resina SOMOS 7110 (Figura 2.69).

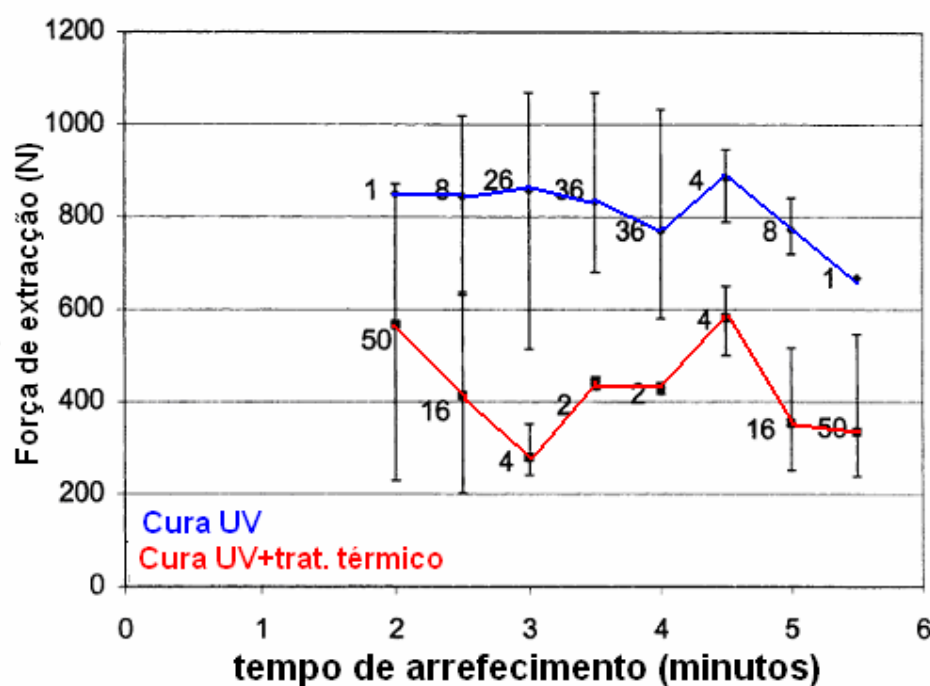


Figura 2.69 – Força de extracção em função do tempo de arrefecimento em insertos com e sem tratamento térmico [37]

Segundo o autor, o tratamento térmico provoca uma diminuição do coeficiente de dilatação térmica do material, o que reduz a interferência entre o inserto e a peça injectada, e portanto uma diminuição da força de extracção.

Hopkinson *et al* [5] também estudaram a força de extracção em função do tempo de arrefecimento em insertos de SL (Figura 2.70).



Figura 2.70 – Peça utilizada por Hopkinson em [5]

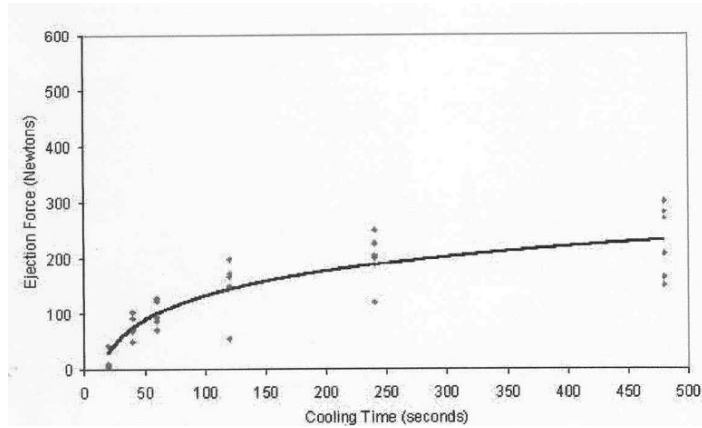


Figura 2.71 – Força de extracção em função do tempo de arrefecimento [5]

O autor comprovou experimentalmente que quanto maior for o tempo de arrefecimento, menor será a temperatura de extracção e portanto maior será a contracção da peça provocando um aumento da força de extracção (Figura 2.71). Para o autor a peça deve ser extraída o mais cedo possível, pois a força de extracção é menor, mas não prematuramente, pois quanto maior for a temperatura do inserto menor é a sua resistência mecânica.

Segundo *Colton e Lebaut* [37], durante a injeção ocorre uma cura térmica do postigo quando este está sujeito a elevadas temperaturas. O inserto também aquece, o que faz com que a contracção da peça seja menor e portanto a força de extracção também diminui (Figura 2.72).

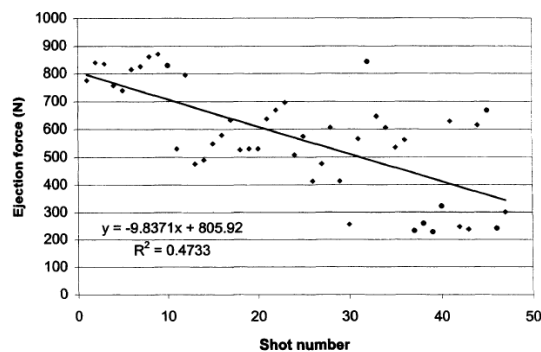


Figura 2.72 – Força de extracção com o nº de ciclos [37]

2.5.8 Insertos com canais de fluxo de calor

Estes insertos têm um sistema de alhetas ou de canais de fluxo de calor (heat flux canals), que devem ser colocados nos locais de maior concentração térmica. Este tipo de inserto mantém um contacto directo entre o material injectado e a parte posterior do inserto (Figura 2.73 e Figura 2.74).

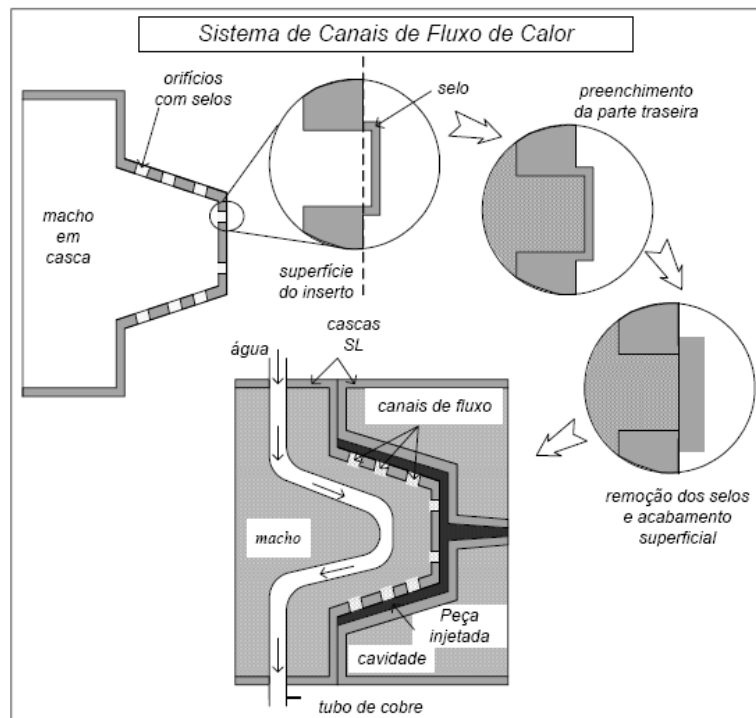


Figura 2.73 – Esquema de canais de fluxo de calor [30]

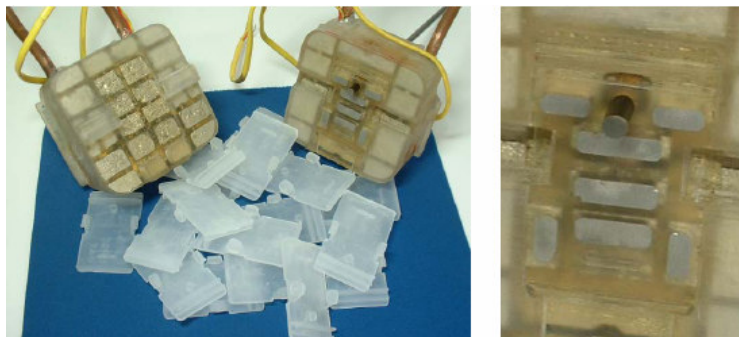


Figura 2.74 – Postigos com canais de fluxo de calor [38]

O inserto é construído com saliências nos locais do fluxo de calor, onde depois de preenchida a parte posterior, estas saliências são lixadas para a sua remoção [30].

Quanto ao preenchimento da parte posterior, Ahrens recomenda que sejam utilizadas ligas com ponto de fusão acima dos 100°C, pois na utilização de uma liga com ponto de fusão de 70°C na injeção de polipropileno a 220°C, o canal apresentou degradação.

Este tipo de inserto é indicado para materiais injectados a temperaturas elevadas, como por exemplo, o policarbonato e a poliamida, pois permite uma melhor transferência de calor da peça e do inserto.

3 Trabalho Experimental

O trabalho experimental divide-se nas seguintes fases:

- Fabrico de postigos em alumínio
- Fabrico de postigos por estereolitografia
- Instrumentação das cavidades moldantes
- Simulação do processo utilizando o software Moldflow
- Simulações térmicas utilizando o software Algor
- Produção de peças utilizando o processo de moldação por injeção.

3.1 Peças a produzir

Para a realização deste trabalho, foram escolhidas 3 peças com diferentes geometrias. A primeira peça é uma placa rectangular de 35x20x2mm, sem nervuras e sem entalhes e com uma secção constante (Figura 3.1). Esta geometria tem como finalidade realizar os primeiros testes com os moldes de estereolitografia. Para facilitar a extracção a peça tem um ângulo de saída de 0.5°. Para ter um fluxo uniforme na cavidade foi desenhado um ataque em lâmina com 0.25mm de espessura.

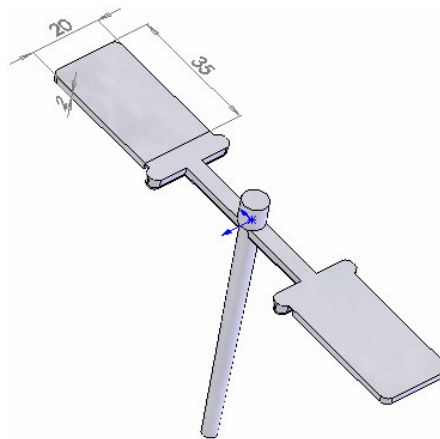


Figura 3.1 – Peça “Placa rectangular” com alimentação

A 2ª peça tem a geometria de uma ficha eléctrica, que sendo totalmente plástica, apenas poderia servir para tapar as tomadas e impedir que as crianças tenham acidentes (Figura 3.2). Esta peça tem geometrias planas e curvas, tem nervuras e apresenta variações de espessura ao longo de toda a peça.

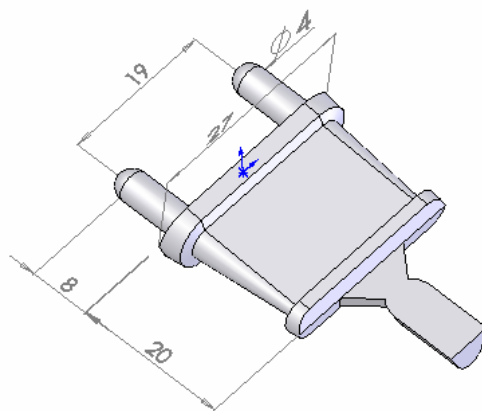


Figura 3.2 – Peça “Ficha Eléctrica”

A 3ª peça é uma fivela plástica macho vulgarmente utilizada em sacos e mochilas (Figura 3.3). Esta peça apresenta em relação às outras uma maior variedade de geometrias e grandes variações de espessura.

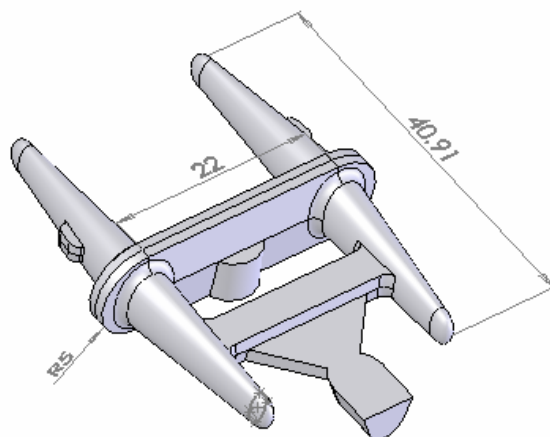


Figura 3.3 – Peça “Engate Plástico Macho”

3.2 Material das moldações

Para a produção das moldações foi escolhido um poliestireno Laqrene 4241 da Atofina e um polipropileno 0D3510 da Borealis. O poliestireno foi utilizado nas 3 peças, enquanto o polipropileno foi apenas empregue no “engate plástico macho”. As propriedades destes materiais estão indicadas no Anexo A .

3.3 Construção dos postigos de alumínio

Foi utilizado um molde existente no Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho. O molde existente apenas necessitou de novos postigos, sendo aproveitado todo o sistema de extracção.

Foram construídos 2 postigos, um para o lado da injeção (Figura 3.4) e outro para o lado da extracção (Figura 3.5).

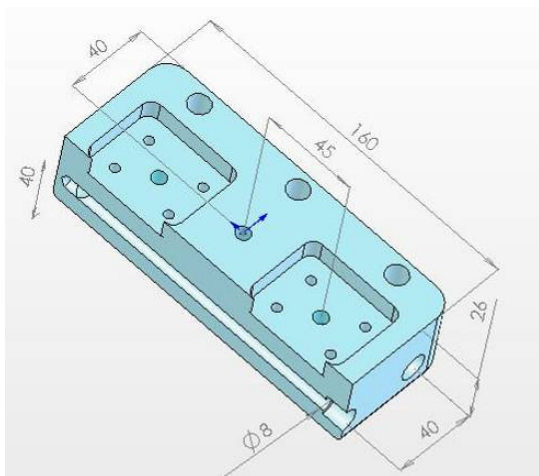


Figura 3.4 – Postigo em alumínio – extracção

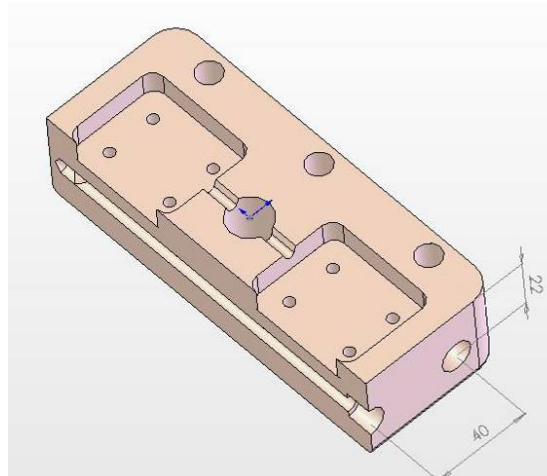
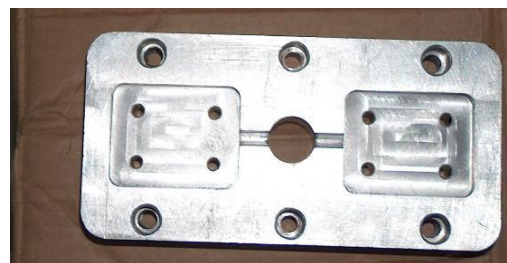


Figura 3.5 – Postigo em alumínio – injeção

Optou-se pela construção em alumínio para promover uma melhor extracção do calor. Estes postigos têm as dimensões de 160x80x40mm e duas cavidades em cada um deles com 50x40x10mm para a colocação dos postigos de SL. Os canais de refrigeração têm um diâmetro de 8mm, com um afastamento de 40mm, a 26mm da face superior do postigo no caso do lado da extracção e a 22mm no caso do lado da injeção. Este posicionamento dos canais de refrigeração foi imposto, pois o aproveitamento do molde existente obrigou a manter estas cotas. No lado da extracção, o molde permite a utilização de 3 extractores, um central e os outros 2 afastados de 45mm ao centro que coincide com o centro das caixas para os postigos de SL.

Para a utilização dos termopares foi necessário abrir um rasgo no postigo de alumínio para a passagem dos fios. Também se verificou que a substituição dos postigos de SL era bastante demorada, pois obrigava a retirar as mangueiras, a retirar o postigo de alumínio e a desapertar os 4 parafusos que estão na parte posterior. Por esse motivo foram abertos 2 furos roscados no postigo de alumínio para fixar o postigo de SL com 2 parafusos M4 (Figura 3.6).

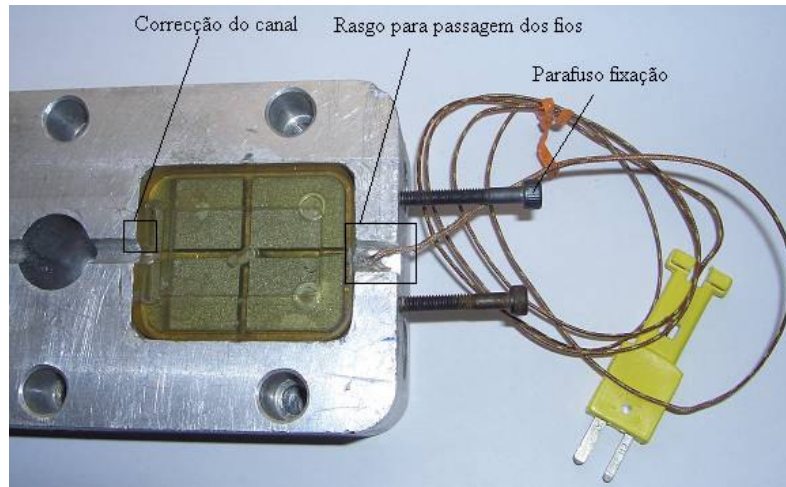


Figura 3.6 – Modificações no postigo de alumínio

No caso da “placa” as peças ficam no lado da injeção. No lado da extracção fica o postigo de SL liso (Figura 3.7)

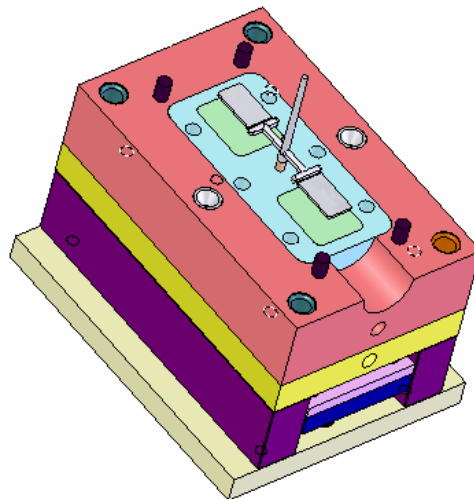


Figura 3.7 – Extracção da “Placa”

Isto faz com que a peça seja extraída logo após a abertura do molde e não com o accionamento dos extractores.

No caso da “ficha” (Figura 3.8) e do “engate plástico” (Figura 3.9) foi alterado o postigo de alumínio para que quando se dê a abertura do molde, as peças estas permaneçam no lado da extracção e só são extraídas após o accionamento dos extractores.

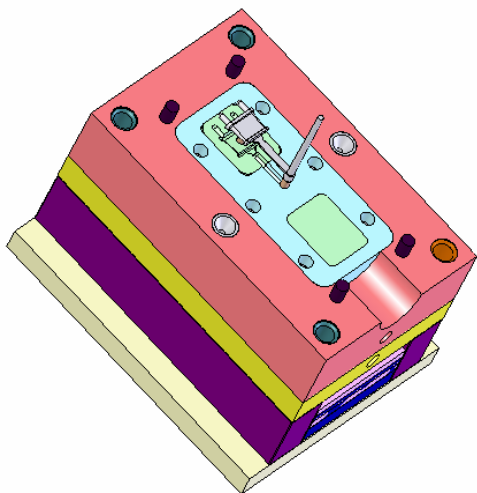


Figura 3.8 – Extracção da “Ficha”

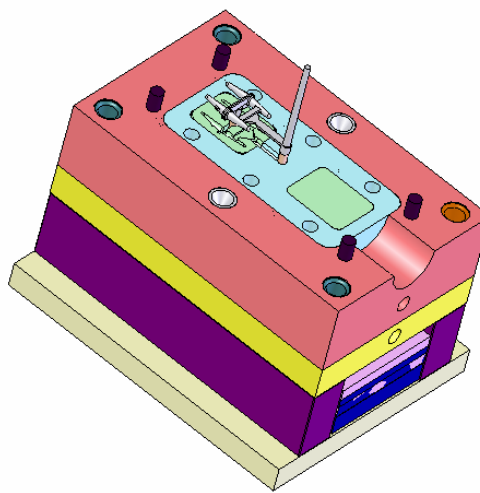


Figura 3.9 – Extracção do “Engate”

Para isso foi necessária a abertura de um canal de alimentação no postigo de alumínio do lado da extracção (Figura 3.10). Nestes 2 casos foi utilizado um extractor no centro das peças.

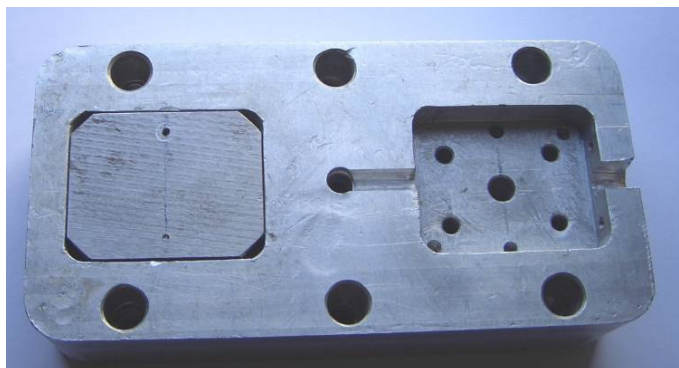


Figura 3.10 – Abertura de canal de alimentação no postigo Alumínio

3.4 Construção dos postigos de estereolitografia

Os postigos em SL foram desenhados em solid Works de forma a terem o menor custo. Estes ocupam apenas a zona da peça a obter, têm dimensões de 50x40x10mm para serem colocados nos postigos de alumínio (Figura 3.4 e Figura 3.5).

Para a “placa” foram desenhados postigos maciços e em forma de casca. Nos postigos maciços foi desenhado um furo de diâmetro 3.2mm, para poder ser aberta uma rosca

M4. Os postigos em forma de casca foram desenhados com espessuras de 2, 2.5 e 3mm. Estes apresentam um reforço interior em forma de cruz (Figura 3.11).

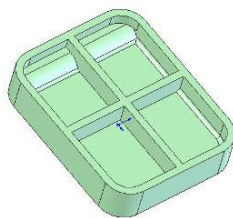


Figura 3.11 – Postigo SL “placa”

Na “ficha eléctrica” foram desenhados postigos com uma casca de 2mm de espessura. No seu interior não existe nenhum reforço e no lado da extracção existe um furo com um diâmetro de 6mm para um extractor (Figura 3.12). Ao longo deste furo existe uma parede com 2mm de espessura. Foi construído na parte traseira do postigo do lado da extracção, alojamentos para os termopares. Estes alojamentos têm por finalidade manter o termopar encostado à superfície do postigo antes da colagem. Também fazem com que o termopar esteja no ponto exacto para a comparação entre as simulações numéricas e as curvas experimentais. As suas dimensões estão representadas na Figura 3.13.

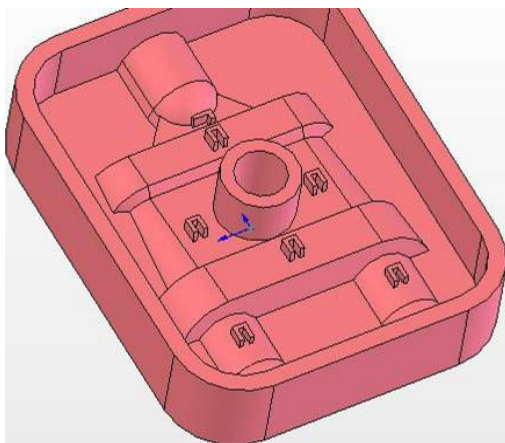


Figura 3.12 – Postigo lado da extracção

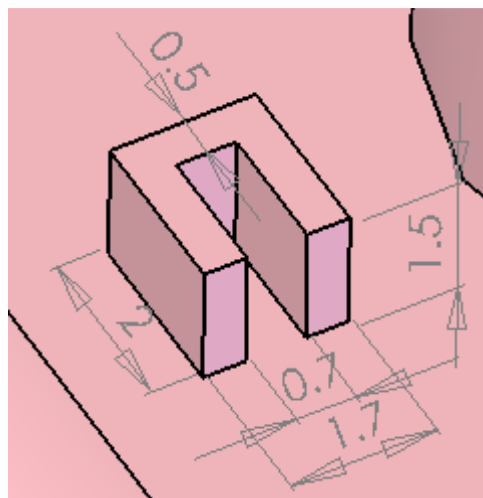


Figura 3.13 – Dimensões do alojamento

No “engate plástico” foi desenhado com uma casca de espessura 2mm (Figura 3.14). Este também tem um furo para um extractor de 6mm de diâmetro e os alojamentos dos termopares têm as mesmas dimensões do caso anterior.

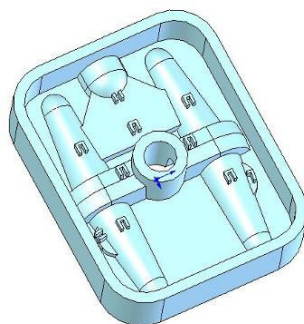


Figura 3.14 – Postiço SL “engate plástico”

Estes ficheiros foram convertidos para o formato STL com uma resolução de 0.01mm. Os postiços de estereolitografia foram fabricados com a resina Accura SI40 da 3DSYSTEMS. Estes foram construídos numa Viper SI2 da 3DSYSTEMS instalada na empresa SolidTech, que tem uma área de construção de 250x250x250mm. A espessura de camada foi de 0.1mm e a potência do laser empregue foi de 100mW. Depois da construção as peças foram limpas com TPM e água. Foi realizada uma pós cura numa câmara de ultra violetas durante 90 minutos. Para as peças adquirirem uma melhor resistência mecânica as peças sofreram um tratamento térmico.

Nos postiços “placa” maciços foi aberta com macho uma rosca M4 (Figura 3.15). Nos postiços em forma de casca foram coladas porcas M4 com super cola 3 para plásticos da Loctite (Figura 3.16).



Figura 3.15 – Postiço SL maciço



Figura 3.16 – Postiço SL casca

Nos postiços de SL em forma de casca da “placa” estes estão deformados na zona do reforço (Figura 3.17).



Figura 3.17 – Postiço SL “placa” em forma de casca

Esta deformação ocorreu devido à cura e aos tratamentos térmicos. Nesta zona a moldação terá menor espessura.

Foram coladas porcas M4 nestes postigos, pois é menos delicada e menos trabalhosa que a furacão e abertura de rosca na resina. Mas a colagem foi muito complicada, pois a maior parte das colas que se encontram à venda, não aderem ao material da estereolitografia. A cola que se mostrou mais eficiente foi a super cola 3 para plásticos da Loctite.

Num postigo maciço ao abrir rosca M4 num dos 4 furos, este partiu-se. Este facto deveu-se à existência de zonas em que a resina não está totalmente curada e abrindo uma fissura, esta propaga-se muito rapidamente.

Nos postigos da “ficha” (Figura 3.18) e no “engate plástico macho” (Figura 3.19) é visível o efeito degrau, sendo mais acentuado no caso da “ficha”.



Figura 3.18 – Efeito degrau no postigo SL “ficha”



Figura 3.19 – Efeito degrau no postigo SL “engate plástico”

3.5 Instrumentação

Para a monitorização da temperatura durante o processo de injeção, foram utilizados termopares tipo K da Omega (Figura 3.20) e da Pico (Figura 3.21). Como depois do enchimento dos postigos de SL não seria possível distinguir os termopares, estes foram identificados com etiquetas plásticas coloridas e numeradas. Para colar os termopares foi utilizada uma cola condutora OMEGA BOND101.



Figura 3.20 – Termopar tipo K OMEGA



Figura 3.21 – Termopar tipo K PICO

Para a “placa” os termopares foram colocados apenas nos postigos de casca com 2mm, do lado da injeção, que tem a cavidade para a placa. Os 2 termopares ficaram no centro da placa a 2mm da superfície exterior (Figura 3.22).



Figura 3.22 – Abertura de furo e rasgo para colocar os termopares

Estes termopares foram colocados depois de os postigos estarem cheios de resina. Para a sua colocação foi necessário furar a parte traseira do postigo e colar os termopares. Esta operação foi de muito difícil execução, deveria ter sido executada antes do enchimento com resina e o local onde o termopar ficou pode não ser o exactamente pretendido.

Na “ficha” foram colados 4 termopares com a disposição mostrada na Figura 3.23 e na Figura 3.24, enquanto no “engate plástico” foram colados 5 termopares como mostrado na Figura 3.25 e na Figura 3.26.

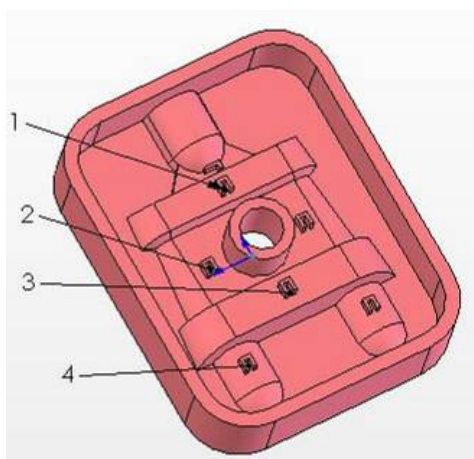


Figura 3.23 – Disposição dos termopares “ficha” vista traseira do postigo de SL

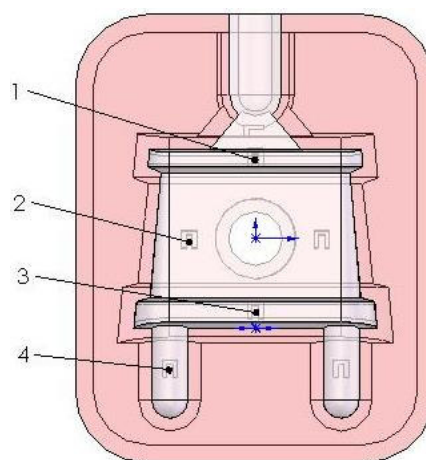


Figura 3.24 – Disposição dos termopares “ficha” vista de frente

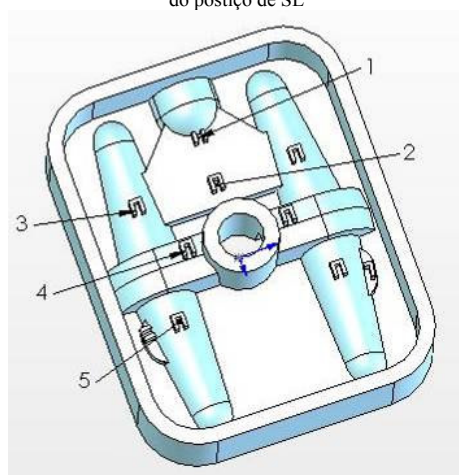


Figura 3.25 – Disposição dos termopares “engate plástico” vista traseira do postigo de SL

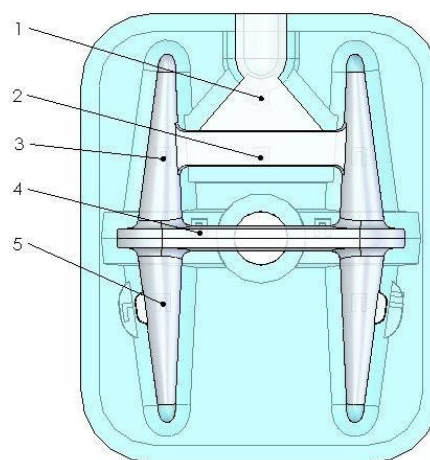


Figura 3.26 – Disposição dos termopares “engate plástico” vista frente

Nos casos da “ficha” e do “engate” os termopares foram colados no postigo do lado da extracção, antes do enchimento. Mas para a passagem dos fios dos termopares foi necessário abrir um furo na parede do postigo de estereolitografia. Esta operação é bastante delicada e teve de ser efectuada com um mini berbequim e em vários passos, pois poderia levar à rotura do postigo.

A colagem dos termopares ao postigo também é muito delicada, pois a cola utilizada adere à estereolitografia, mas tem um tempo de cura de cerca de 12 horas. Durante esse período, temos de garantir que os termopares não se deslocam e que permanecem em contacto com a superfície da estereolitografia, o que é muito difícil dado a quantidade de fios num espaço tão reduzido.

Para o registo das temperaturas foram usados o leitor OMEGA HH506RA (Figura 3.27) e o Pico USB TC-08 (Figura 3.28). O Omega HH506RA regista a temperatura de 2

termopares em intervalos de 1 segundo, enquanto o Pico USB TC-08 pode ler simultaneamente 8 termopares em intervalos de 1 milissegundo. Estes aparelhos ligados a um PC permitem a visualização dos diversos valores das temperaturas tanto na forma de tabela como em gráfico.



Figura 3.27 – Leitor OMEGA HH506RA



Figura 3.28 – Leitor de temperaturas Pico TC-08

3.6 Material de enchimento

Para o enchimento dos postigos de SL em forma de casca, foram utilizadas as resinas com alumínio da Metalceys (Figura 3.29) e da Devcon (Figura 3.30).



Figura 3.29 – Resina Metalceys



Figura 3.30 – Resina Devcon Aluminium Liquid (F-2) Epoxy

A resina Metalceys tem um tubo de resina e um boião de alumínio em pó que têm de ser misturados antes de aplicar. A resina Devcon é composta por uma pasta epoxy com alumínio e um endurecedor. Estes componentes têm de ser misturados numa proporção em peso de nove partes de resina para uma de endurecedor.

A resina da MetalCeys foi utilizada para os postigos em forma de casca da “placa”, enquanto a resina Devcon foi utilizada na “ficha” e no “engate plástico”.

Como a resina com o alumínio é um material denso e viscoso, ao depositar-se não forma uma superfície lisa e uniforme. A sua superfície é irregular formada por picos e depressões como mostrado na Figura 3.31.



Figura 3.31 – Superfície do enchimento irregular

Esta superfície deve ser lisa e encostar perfeitamente no postigo de alumínio para haver uma boa condução do calor. Se tentarmos encher mais o postigo, podemos necessitar de operações posteriores, como por exemplo, termos de lixar o material em excesso. Se estas operações não forem bem executadas, corremos o risco de não garantir um paralelismo entre as 2 superfícies. Para eliminarmos esse problema utilizamos a montagem da Figura 3.32.



Figura 3.32 – Montagem para enchimento



Figura 3.33 – Enchimento obtido com a montagem anterior

Cortamos 2 placas de alumínio com as dimensões do postigo de estereolitografia. Para não haver o risco das placas fiquem coladas à resina do enchimento, estas foram revestidas com fita de alumínio autocolante. A placa do lado da cavidade moldante foi presa à estereolitografia com fita isoladora. O objectivo desta fita é impedir que a resina em excesso esorra e danifique o molde. Também foi necessário tapar o furo de passagem dos fios dos termopares para evitar que a resina saísse. O postigo foi cheio com resina em excesso, colocou-se a outra placa de alumínio e o alicate de pressão manteve o conjunto fechado. Mal se apertou a montagem houve resina que escorreu, pelo que foi necessária a sua limpeza imediata. Após 12 horas, desmontou-se o conjunto

sem que houvesse aderência do alumínio ao enchimento. Como se pode ver na Figura 3.33 a nova superfície é lisa e não necessita de nenhuma operação de acabamento.

3.7 Simulações de fluxo (Moldflow)

As simulações do processo de injeção são realizadas numa etapa inicial do projecto de moldes de injeção e têm como objectivos definir a localização do ponto de ataque e escape de gases, otimizar as condições de injeção, prever o comportamento pós processamento das peças injectadas e determinar os parâmetros de regulação do equipamento. As simulações, podem melhorar o projecto dos moldes, mas em contrapartida consomem bastante tempo. Estes softwares não conseguem representar fielmente os moldes híbridos, como é o caso dos moldes de estereolitografia em forma de casca e cheios de resina. O material da resina e do enchimento têm diferentes propriedades e o software não consegue reflectir essa situação. Como tal, estas simulações não pretenderam ser muito minuciosas, mas apenas prever e corrigir alguns defeitos das peças e servir de ponto de partida para a afinação das máquinas e do processo nas primeiras injeções.

3.7.1 Modelo de elementos finitos

Os modelos 3D das peças foram gerados num modelador paramétrico de sólidos, Solid Works 2004, SP0. Para representar fielmente as peças, estas foram desenhadas com o sistema de alimentação e ataque, visto que a utilização do molde existente não permitia a alteração da alimentação. Estes ficheiros foram importados no formato IGES e STEP. No caso da ficha eléctrica, em que a geração da malha não foi problemática foi utilizado o ficheiro IGES, nos outros casos como houve problemas com a malha foi utilizado o formato STEP, pois este é um protocolo de transferência mais preciso que outros formatos CAD. Estes ficheiros foram abertos no software MPI – Moldflow Plastic Insight, v4.0 que tem capacidade para importar este tipo de ficheiros. Foram geradas as malhas e depois foi necessária a verificação do modelo de elementos finitos.

A verificação incidiu nos seguintes aspectos:

- Deve existir apenas uma região de conectividade;
- A taxa de distorção (aspect ratio) deve ter um valor máximo inferior a 6 e um valor médio inferior a 4;
- Não devem existir elementos sobrepostos (overlap);
- Não devem existir arestas livres (free edge).

3.7.1.1 Peça “Placa rectangular”

Os modelos originais foram criados em solid works e exportados no formato STEP. No Moldflow foram geradas malhas tipo “Fusion” de elementos finitos com tamanho de aresta de 2mm e tolerância de aresta de 0.01mm.

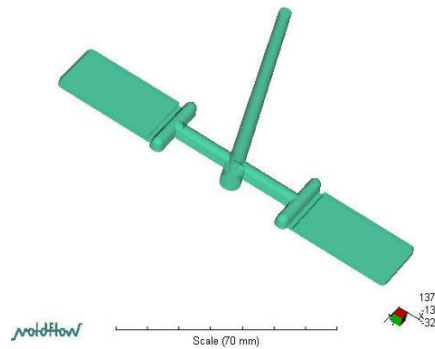


Figura 3.34 – Superfícies de definição da peça

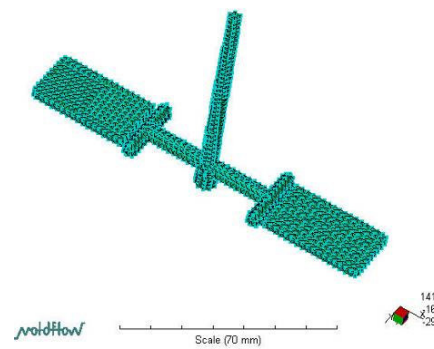


Figura 3.35 – Modelo de elementos finitos

Com a verificação da malha, constatou-se que a maior parte dos erros estava na placa da direita (Figura 3.36). No Solid works não era visível qualquer anomalia do modelo, mas uma análise ao ficheiro STEP em Rhinoceros foi possível movimentar a placa da direita (Figura 3.37) pois esta não está ligada à restante peça, formando 2 sólidos independentes.

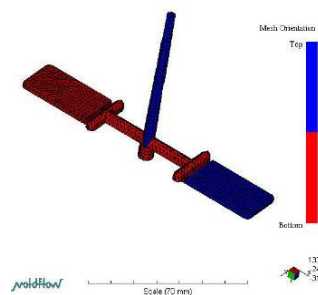


Figura 3.36 – Resultado gráfico da orientação da malha

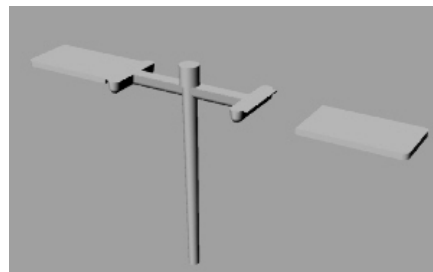


Figura 3.37 – Visualização em Rhinoceros 3D

Como a correcção da malha seria muito demorada e como a peça é simétrica, foi decidido desenhar apenas a parte esquerda, corrigir a malha e fazer um espelho (mirror) obtendo a peça completa.

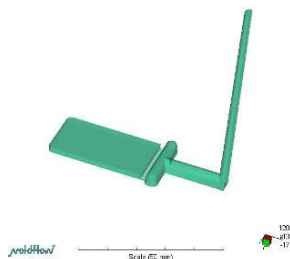


Figura 3.38 – Superfície de definição da peça só com lado esquerdo

O relatório da estatística da malha revelou que existiam 38 arestas livres (Tabela 8-18). A representação gráfica é mostrada na Figura 3.39.

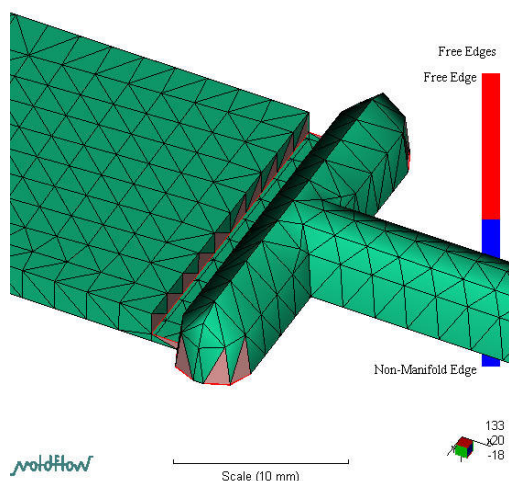


Figura 3.39 – Resultado gráfico de arestas livres

Depois de corrigidas as arestas livres foi espelhada a peça (mirror) e corrigidos os erros. O relatório estatístico da malha confirmou que não existiam erros (Tabela 8-19). Foi desenhado o sistema de controlo de temperatura. Estes canais têm um diâmetro de 8mm onde circula água a 25°C. Como o arrefecimento nos moldes de SL é muito lento, optou-se por simular um sistema ineficiente com um n° de Reynolds de 1000. O modelo final, com as linhas de água e a superfície do molde, apresenta 3474 elementos de malha tipo “fusion” (Tabela 8-20).

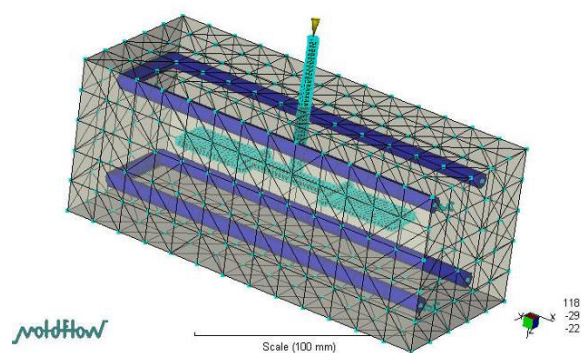


Figura 3.40 – Modelo de elementos do molde “placa”

3.7.1.2 Peça “Ficha eléctrica”

O modelo original foi exportado no formato IGES. No Moldflow foram geradas malhas tipo “Fusion” de elementos finitos com tamanho de aresta de 2mm e tolerância de aresta de 0.01mm.

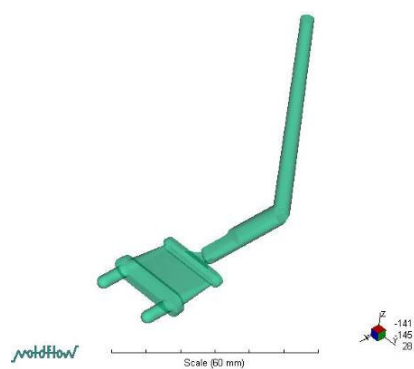


Figura 3.41 – Superfícies de definição da peça “ficha”

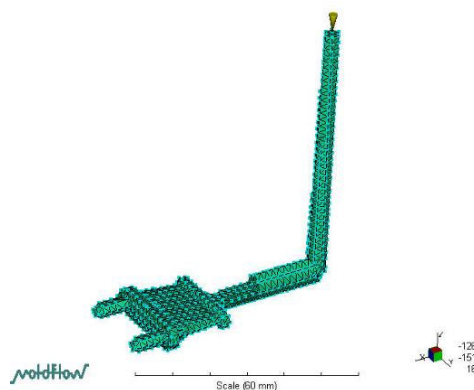


Figura 3.42 – Modelo de elementos finitos “ficha”

O relatório da estatística da malha revelou que existiam elementos muito distorcidos, sendo o valor máximo de distorção de 13.8 (Tabela 8-21).

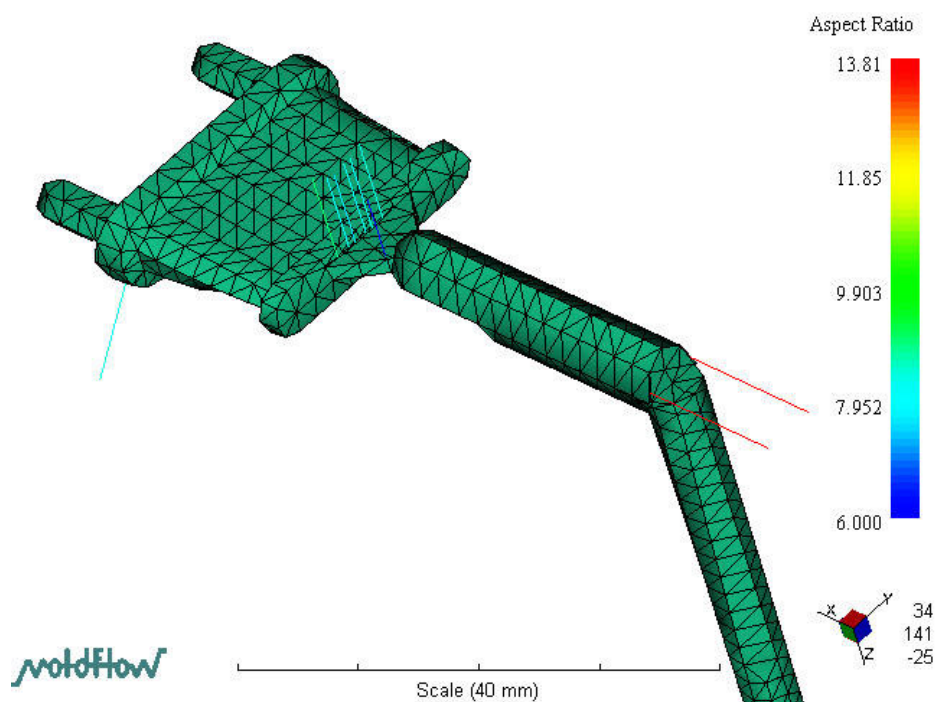


Figura 3.43 – Resultado gráfico de distorção antes da correcção

Os elementos mais distorcidos foram corrigidos manualmente até termos um factor menor que 6 (Tabela 8-22).

Foi desenhado o sistema de controlo de temperatura. Estes canais têm um diâmetro de 8mm onde circula água a 25°C. Como o arrefecimento nos moldes de SL é muito lento, optou-se por simular um sistema ineficiente com um n° de Reynolds de 1000. O modelo final, com as linhas de água e a superfície do molde, apresenta 2182 elementos de malha tipo “fusion” (Tabela 8-23).

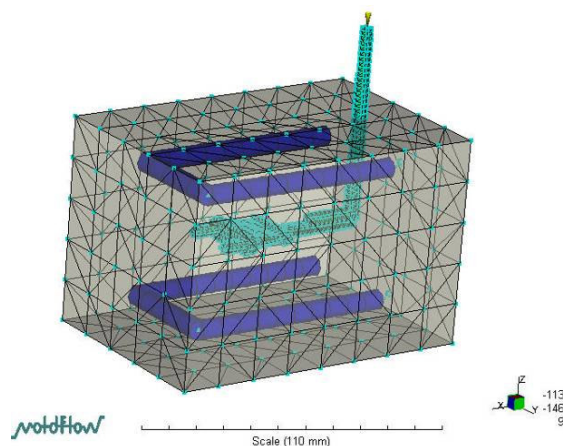


Figura 3.44 – Modelo de elementos do molde “ficha”

3.7.1.3 Peça “Engate plástico macho”

O modelo original foi criado em solid works e exportado no formato STEP. No Moldflow foram geradas malhas tipo “Fusion” de elementos finitos com tamanho de aresta de 2mm e tolerância de aresta de 0.01mm.

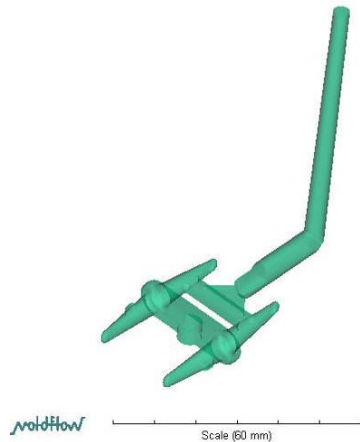


Figura 3.45 – Superfícies de definição da peça “engate plástico”

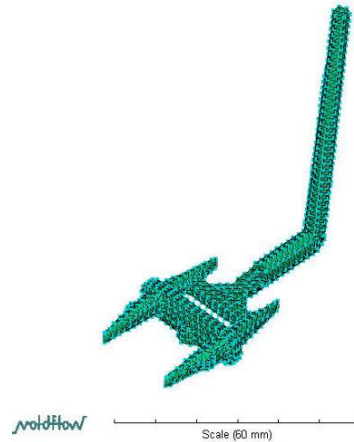


Figura 3.46 – Modelo de elementos finitos “engate plástico”

O relatório da estatística da malha (Tabela 8-24) revelou que existiam 48 arestas livres (Figura 3.47), 40 intersecções (Figura 3.48) e a distorção máxima dos elementos era de 27.4 (Figura 3.49).

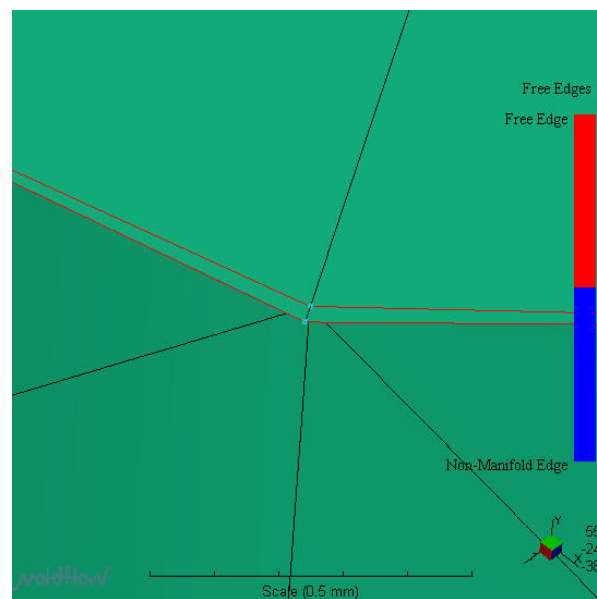


Figura 3.47 – Arestas livres

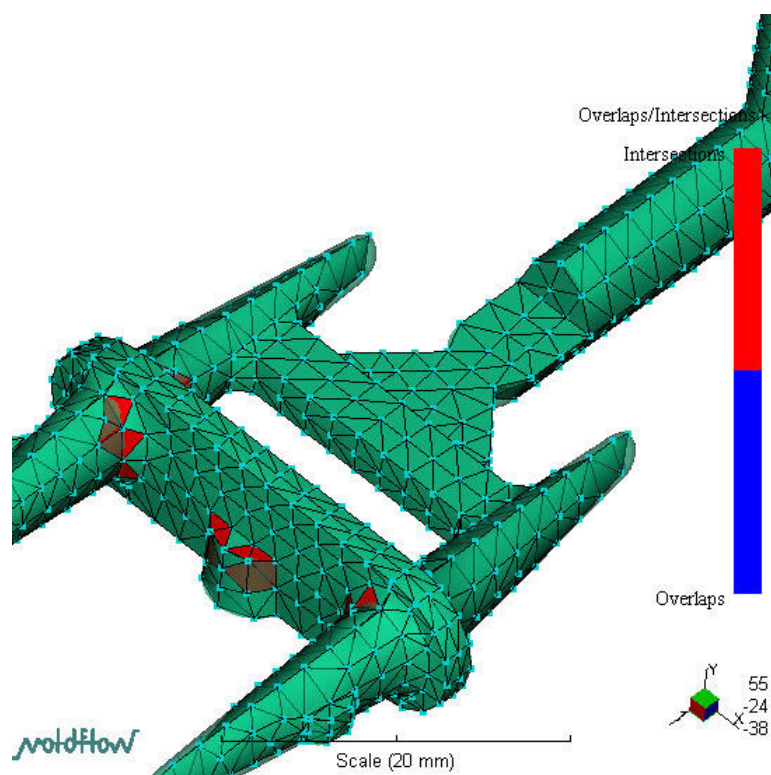


Figura 3.48 – Intersecções

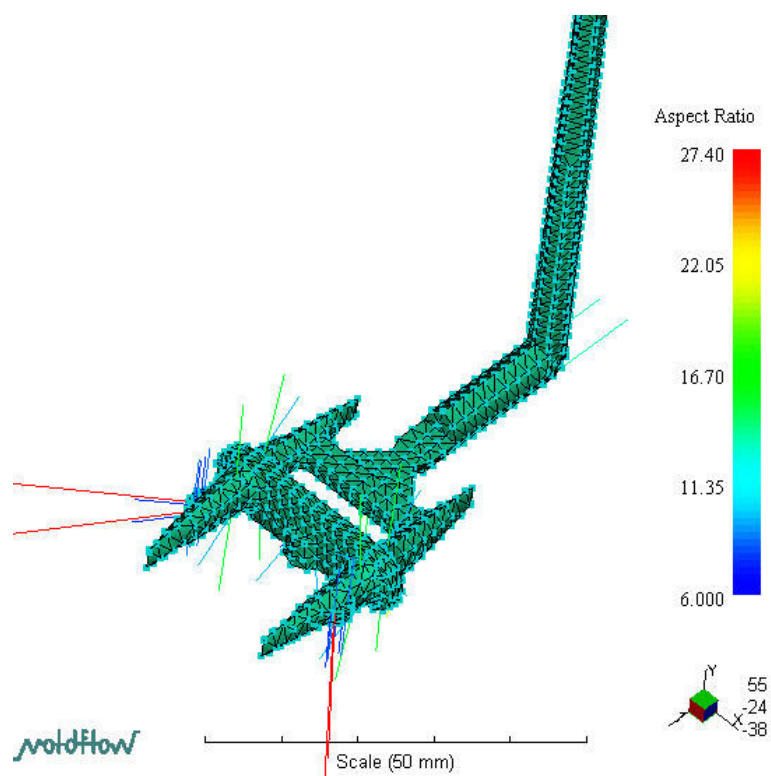


Figura 3.49 – Distorção

O modelo foi corrigido manualmente, de maneira a não existirem arestas livres, nem intersecções e com uma distorção máxima de 6 (Tabela 8-25).

Foi desenhado o sistema de controlo de temperatura. Estes canais têm um diâmetro de 8mm onde circula água a 25°C. Como o arrefecimento nos moldes de SL é muito lento, optou-se por simular um sistema ineficiente com um nº de Reynolds de 1000. O modelo final, com as linhas de água e a superfície do molde, apresenta 2948 elementos de malha tipo “fusion” (Tabela 8-26).

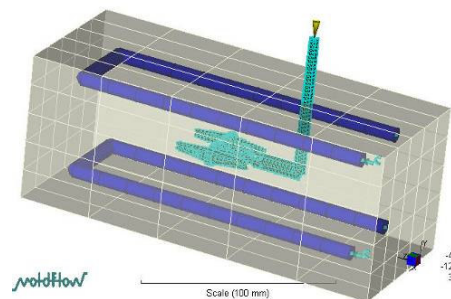


Figura 3.50 – Modelo de elementos finitos do molde “engate plástico”

A sequência da simulação utilizada foi Enchimento – Arrefecimento – Enchimento (Flow – Cool – Flow). O material injectado considerado nas simulações foi o Lacqrene 4241 da Atofina que consta da base de dados de materiais termoplásticos do Moldflow. O material das cavidades moldantes não se encontra na base de dados, pelo que foi necessária a adição deste material. As propriedades consideradas para a cavidade moldante de resina estão indicadas no anexo A.1 .

3.8 Simulações térmicas utilizando o software Algor

Para estudar o comportamento térmico dos postigos de estereolitografia, foram feitas simulações no programa ALGOR. Para isso, foi desenhado em Solid Works uma montagem parcial da peça, dos postigos em SL e alumínio. Estas peças foram simplificadas, pois alguns pormenores construtivos não iriam interessar para o estudo térmico. Nos postigos de alumínio foram representados os furos do sistema de controlo da temperatura com um diâmetro de 8mm. Esta montagem foi exportada para o programa ALGOR. Para promover a troca de calor entre as várias peças, a malha foi gerada com nós coincidentes entre as superfícies de contacto. Assim o contacto será

perfeito e a temperatura nas superfícies de contacto será a mesma. As montagens utilizadas para a simulação em ALGOR dos vários casos estão representadas na Figura 3.51 à Figura 3.53. Por uma questão de economia de processamento, em todas as montagens só foi considerada metade dos postigos de alumínio.

No caso da “placa” (Figura 3.51) foi feita uma montagem com os 2 blocos de alumínio, 2 postigos de estereolitografia, os enchimentos da estereolitografia e a peça. Nos outros casos, foi considerado 1 postigo de alumínio, 1 postigo de estereolitografia e o seu enchimento, e metade da peça (Figura 3.52 e Figura 3.53).

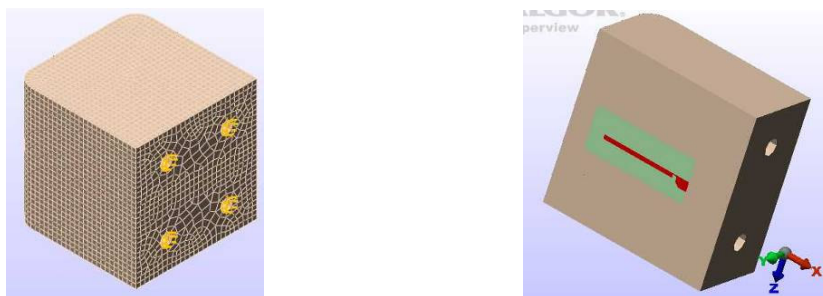


Figura 3.51 – Montagem para Algor da “placa” Esquerda – Montagem completa Direita – Vista em corte

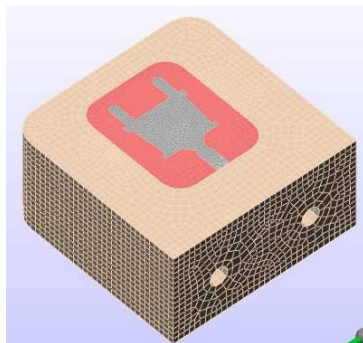


Figura 3.52 – Montagem para Algor da “ficha”

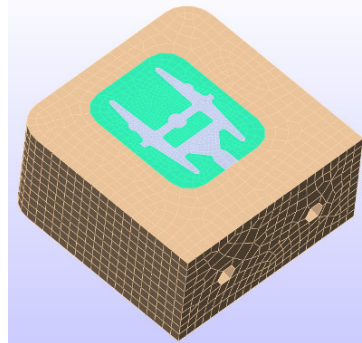


Figura 3.53 – Montagem para Algor do “engate plástico”

Na “placa” criaram-se pontos de refinamento automático com uma malha de 2.5mm. No restante conjunto a malha tem 3.5mm (Figura 3.54).

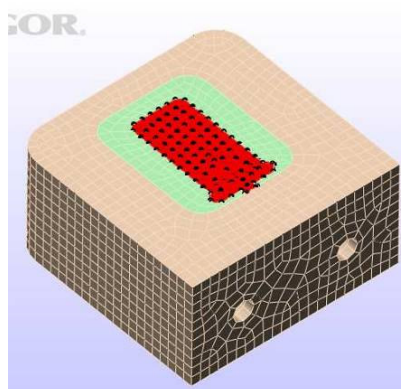


Figura 3.54 – Geração da malha na “placa”

Na “ficha eléctrica” foi criado 1 ponto de refinamento com um raio de 20mm e malha de 1mm. Nas proximidades dos alojamentos foram criados pontos de refinamento com raio 1mm e malha 0.35mm. Nas restantes zonas a malha tem 2.34mm (Figura 3.55).

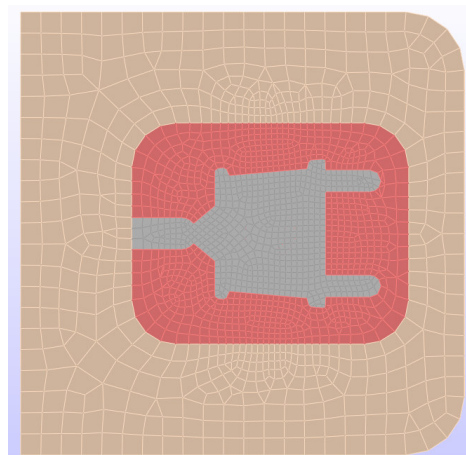


Figura 3.55 – Geração da malha “ficha”

Para o “engate plástico” foi criado 1 ponto de refinamento com um raio de 15mm e malha de 1mm. Nas proximidades dos alojamentos foram criados pontos de refinamento com raio 1mm e malha 0.35mm. Nas restantes zonas a malha tem 3.66mm (Figura 3.56).

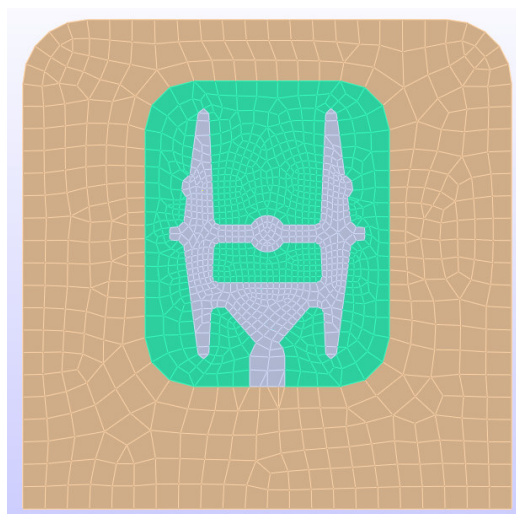


Figura 3.56 – Geração da malha “engate plástico”

Foi considerado que a refrigeração acontece com a circulação de água a 25 °C com um caudal de 0.3L/min. As propriedades consideradas para a água nas simulações estão indicadas na Tabela 3-1 (propriedades da água a 26.67°C).

Tabela 3-1 – Propriedades da água [39]

Propriedades da água a 80 °F (26.67 °C)	
Massa volúmica ρ	995.8 kg/m ³
Viscosidade dinâmica μ	9.8x10 ⁻⁴ kg/ms
Calor específico C_p	4.179 kJ/kg°C
Condutibilidade térmica k	0.614 W/m°C

Foi considerado que no momento inicial todos os nós da peça injectada vão estar à mesma temperatura. Quando se inicia a 1ª injeção, tanto os postigos de SL como os de alumínio estão à temperatura de 25°C. Para simular esta situação no programa ALGOR, colocam-se todos os nós por defeito a uma temperatura de 25°C na 1ª simulação. Para considerar a situação do molde aberto, foi considerada uma condição de convecção natural que ocorre desde que o molde abre até ao fecho deste. No fim desta simulação, vamos utilizar as temperaturas finais dos nós como condição inicial para a próxima simulação.

Considerou-se que as propriedades relevantes para o estudo térmico não variam com a temperatura e os seus valores estão indicados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Propriedades da Resina SL, da peça, do enchimento e do alumínio

	Resina SL	Peça PS	Peça PP	Enchimento	Alumínio
Massa volúmica ρ (kg/m ³)	1100	1047	0929	1100	2700
Condutibilidade térmica k (W/m°C)	0.18	0.145	0.176	0.5	167
Calor específico C_p (kJ/kg°C)	1.047	1.170	2.800	1.047	0.896

Para a “placa” colocaram-se todos os nós da peça a **200°C**. Nestas simulações não foi definido um tempo de ciclo constante, mas sim uma temperatura de referência para a qual se dá início a um novo ciclo. Foram realizadas várias simulações, fazendo variar a temperatura de início de novo ciclo e o tempo de arrefecimento com o molde fechado. Foram realizadas simulações com as combinações da temperatura de início de ciclo e do tempo de arrefecimento com o molde fechado, como indicado na Tabela 3-3. O material da peça foi o poliestireno. A análise transiente foi realizada com intervalos de 4s durante o tempo de ciclo.

Tabela 3-3 – Temperatura de referência e tempo de arrefecimento com molde fechado utilizados na simulação da “placa”

Temperatura de início de novo ciclo [°C]	Tempo de arrefecimento com molde fechado [s]
40	–
	40
	45
45	35
	40
	45
50	35
	40
	45
55	35
	40
	45

Para a “ficha eléctrica” já foi considerado o tempo de ciclo de **180s**. No momento inicial toda a peça vai estar à temperatura de **240°C**. O material considerado na simulação foi o **poliestireno**. A análise transiente foi realizada com intervalos de 4s durante 180s.

No “engate plástico macho” utilizou-se o **poliestireno** e o **polipropileno** para as simulações. No caso do poliestireno a temperatura inicial da peça foi de **240°C**, enquanto que com o polipropileno foi de **230°C**. A análise transiente foi realizada com intervalos de 4s durante **180s**.

3.9 Produção das Moldações

3.9.1 Peça “Placa”

Para a injeção de peças “placa” foi utilizada a injectora Klocker Ferromatic e o material injectado foi Poliestireno Lacqrene 4241 da ATOFINA. A água de refrigeração estava regulada a 25°C e a temperatura ambiente era de 25°C. O Poliestireno foi injectado com uma temperaturas de 230°C. O tempo de Injecção foi de **2.5s**, com **5s** de 2ª pressão, seguido de um arrefecimento com o molde fechado de **35s**. Após a abertura do molde o extractor era accionado. No final de cada extracção era colocado manualmente um termopar tipo k no meio do postigo de SL liso. Quando a temperatura atingia os 40°C, era retirado o termopar, fechado o molde e iniciado um novo ciclo. Em virtude da colocação ser manual o termopar nem sempre era colocado no mesmo ponto (Figura 3.57).



Figura 3.57 – Colocação manual do termopar

As primeiras injeções foram realizadas nos postigos maciços e as restantes nos postigos em forma de casca com 2 e 3mm de espessura.

De seguida foram colocados 2 termopares no postigo de casca com 2mm de espessura a 2mm da superfície moldante. Foram injectadas peças em poliestireno Lacqrene 4241 com uma temperatura de 230°C. O tempo de injeção foi de **2.5s**, seguido de uma pressurização durante **5s**. A temperatura da água de refrigeração estava regulada a 25°C e a temperatura ambiente era de 16°C.

As várias injeções foram realizadas variando a temperatura de início de novo ciclo e o tempo de arrefecimento com o molde fechado e o postigo como indicado na Tabela 3-3.

3.9.2 Peça “Ficha eléctrica”

Na Engel ES200/45 HL-V foram injectadas peças em Lacqrene 4241. O poliestireno foi injectado a 240°C. O tempo de injeção foi de 1.3s e o tempo de 2ª pressão de 10s. As injeções realizaram-se para tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s. Os restantes parâmetros como o tempo de injeção, o tempo de 2ª pressão, o tempo de arrefecimento com o molde fechado e o tempo de molde aberto variaram como mostrado na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 – Variação dos tempos de ciclo para “ficha”

tempo injeção (s)	1.7	1.7	1.7	1.7
tempo 2ª pressão (s)	10	10	10	10
tempo arref. molde fechado (s)	80	110	160	190
tempo molde aberto (s)	8.3	8.3	8.3	8.3
soma	100	130	180	210

Foram registadas as temperaturas de 4 termopares colocados no postigo. As curvas experimentais para o ciclo de 180s foram comparadas com as curvas obtidas na simulação numérica em Algor para o mesmo tempo de ciclo.

3.9.3 Peça “Engate plástico”

As peças foram injectadas em poliestireno Lacqrene 4241 e em polipropileno Borealis na Engel ES200/45 HL-V. O poliestireno foi injectado a 240°C e o polipropileno a 230°C. O tempo de injeção foi de 0.92s a uma velocidade de 10mm/s, o tempo de 2ª pressão de 20s a uma pressão de 8bar. Os tempos de ciclo foram de 130, 180, e 230s para a injeção de PS e PP. Os restantes parâmetros variaram como mostrado na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 – Variação dos tempos de ciclo para “engate”

tempo injeção (s)	1.2	1.2	1.2
tempo 2ª pressão (s)	20	20	20
tempo arref. molde fechado (s)	104	154	204
tempo molde aberto (s)	4.8	4.8	4.8
soma	130	180	230

Foram registadas as temperaturas dos 5 termopares colocados no postigo.

As curvas experimentais da injeção de poliestireno e de polipropileno para um ciclo de 180s foram comparadas com as curvas obtidas na simulação numérica em Algor para os mesmos materiais e para o mesmo tempo de ciclo.

4 Resultados

Os resultados apresentados neste capítulo estão agrupados nos seguintes temas:

- Simulação do processo utilizando software Moldflow
- Produção de peças utilizando o processo de moldação por injeção.
- Simulações térmicas utilizando software Algor e comparação com dados experimentais.

4.1 Simulações de fluxo

A simulação do processo permite otimizar o processo alterando parâmetros como a temperatura do fundido, a temperatura do molde, o tempo de ciclo, o tempo de compactação, o tempo de refrigeração e o tempo de molde aberto.

Nas simulações o material escolhido para as moldações foi o poliestireno Lacqrene 4241 da Atofina. A temperatura de injeção foi de 240°C, a temperatura do molde de 40°C e a temperatura da água de refrigeração de 25°C. Os restantes parâmetros estão indicados no Anexo D.

4.1.1 Temperatura média no final do enchimento

Da análise das figuras não se verificam pontos onde a temperatura esteja próxima da temperatura de degradação. Também não se prevêem moldações incompletas, pois não existem pontos onde a temperatura seja inferior à temperatura de não fluxo do material (100°C).

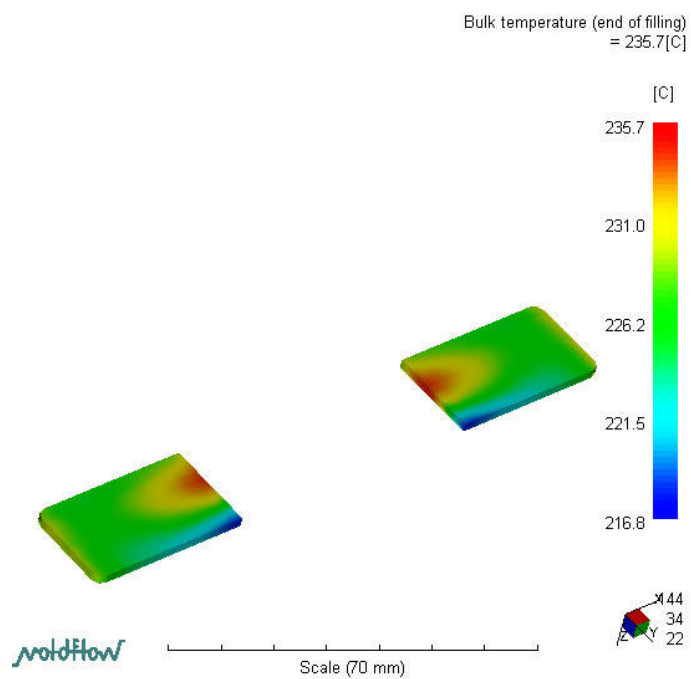


Figura 4.1 – Temperatura média “Placa”

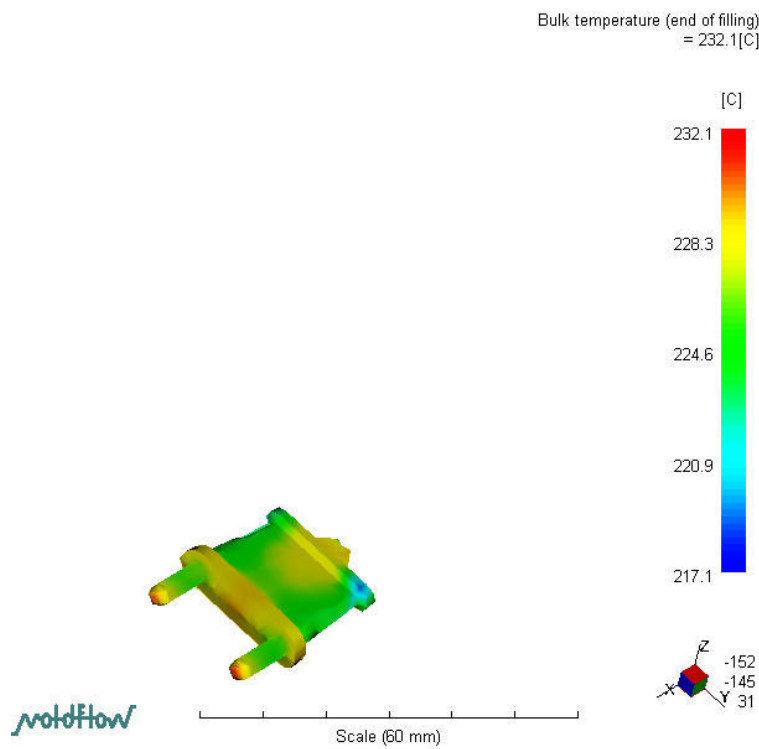


Figura 4.2 – Temperatura média “Ficha”

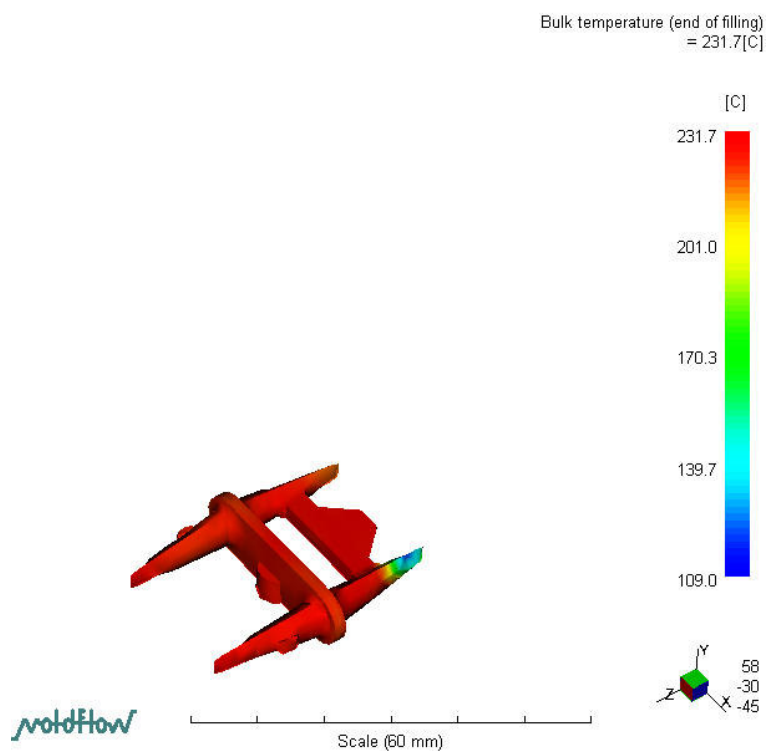


Figura 4.3 – Temperatura média “Engate plástico”

4.1.2 Temperatura do circuito de água

Em todos os casos a variação da temperatura da água de refrigeração é inferior a 5°C, pelo que o sistema de refrigeração está sobredimensionado.

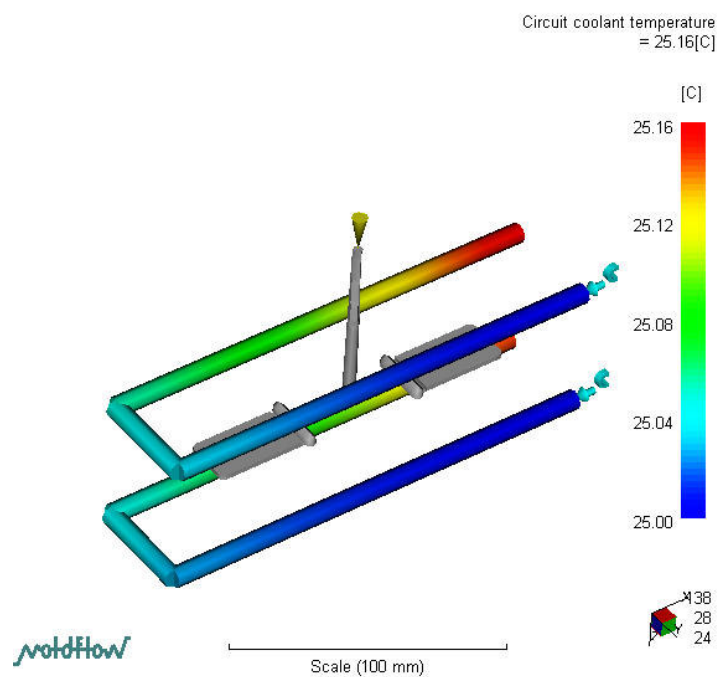


Figura 4.4 – Temperatura do circuito de água “Placa”

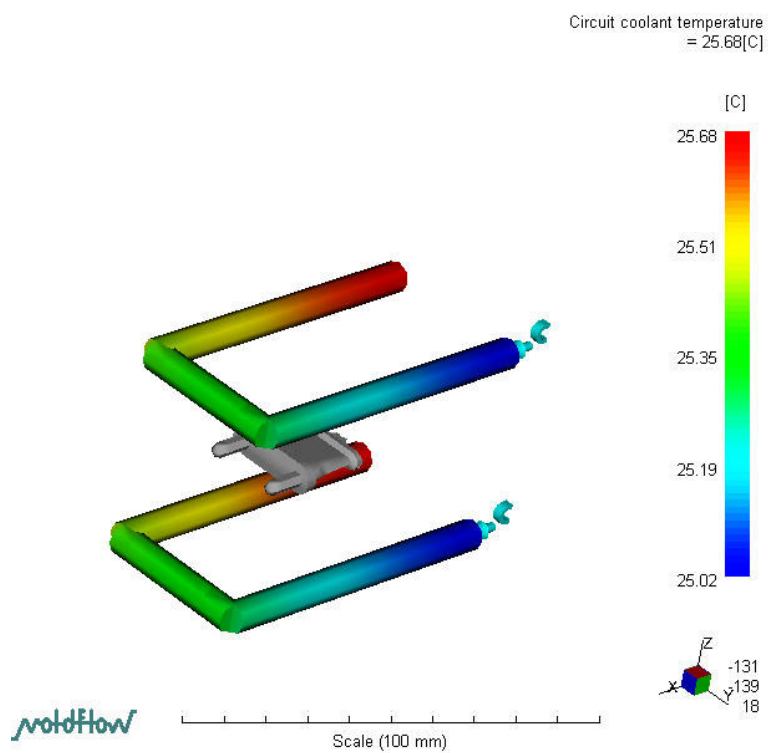


Figura 4.5 – Temperatura do circuito de água “Ficha”

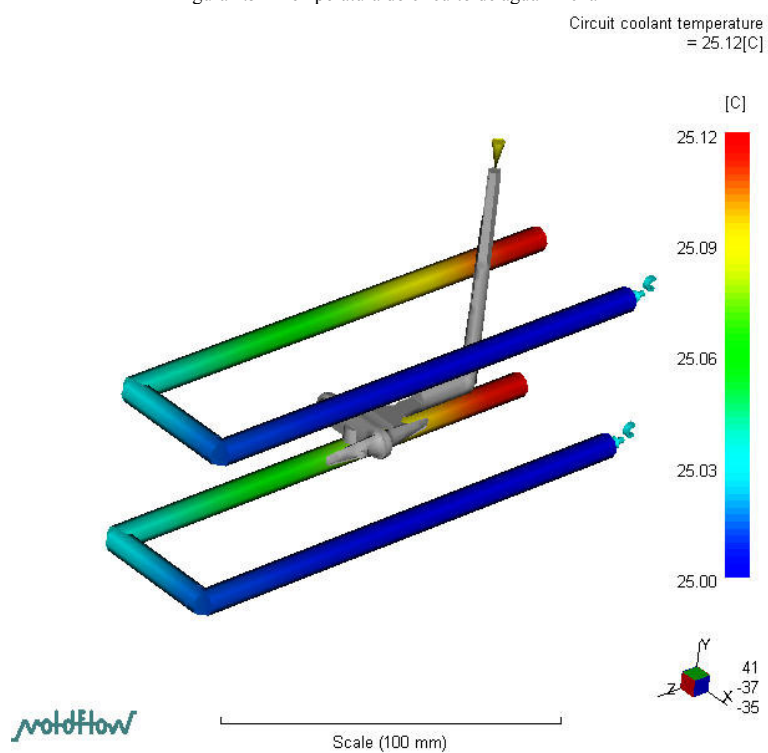


Figura 4.6 – Temperatura do circuito de água “Engate plástico”

4.1.3 Tempo para solidificação

Na peça “placa” o tempo de solidificação é uniforme em toda a peça e situa-se aproximadamente no 13 segundos. Na “ficha” este tempo é bastante variável ao longo da peça. Varia dos 2.7s até aos 26s na zona mais espessa da moldação. No “engate plástico” este tempo varia do 1s aos 27s. As zonas mais espessas são as que demoram mais a solidificar, mas com esta peça tem muitas variações de espessura, existem muitos pontos na peça que necessitam de mais tempo de arrefecimento.

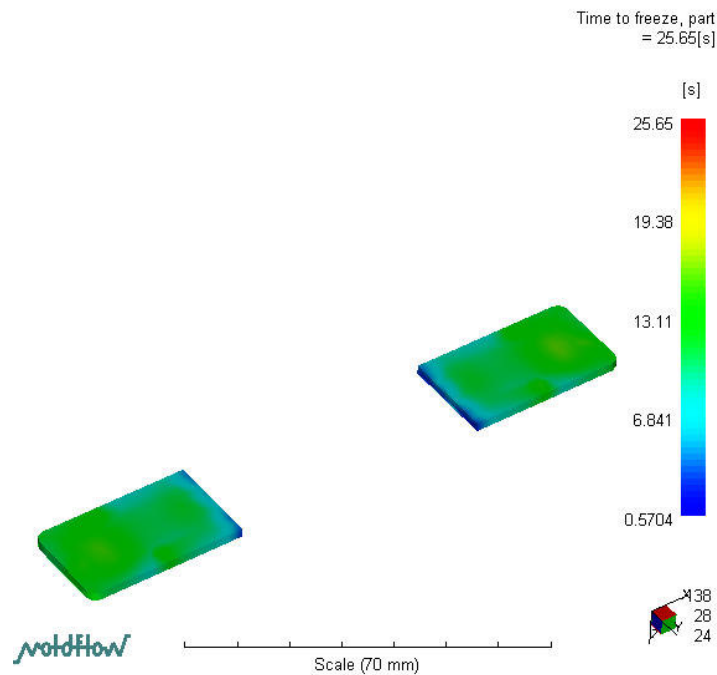


Figura 4.7 – Tempo de solidificação “Placa”

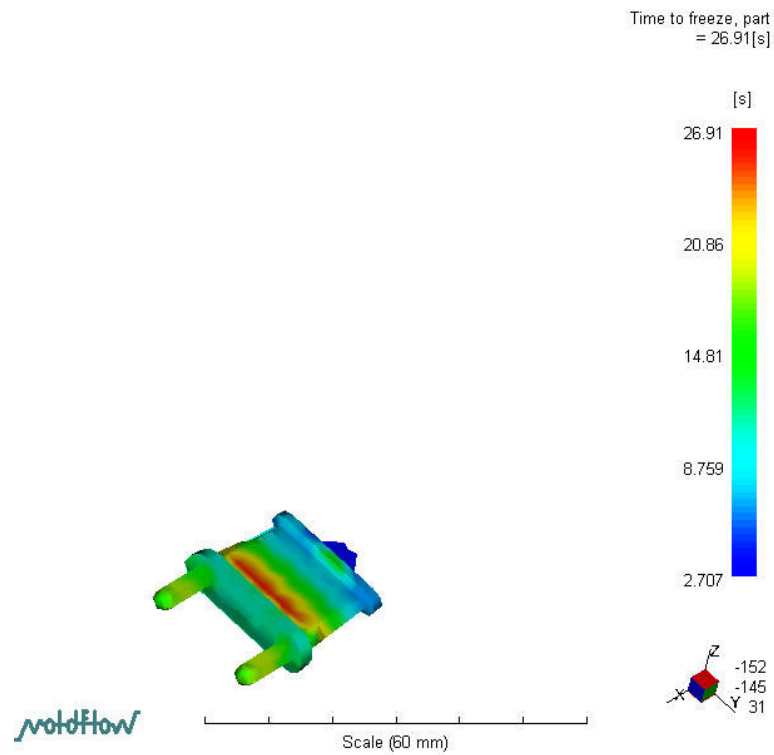


Figura 4.8 – Tempo de solidificação “Ficha”

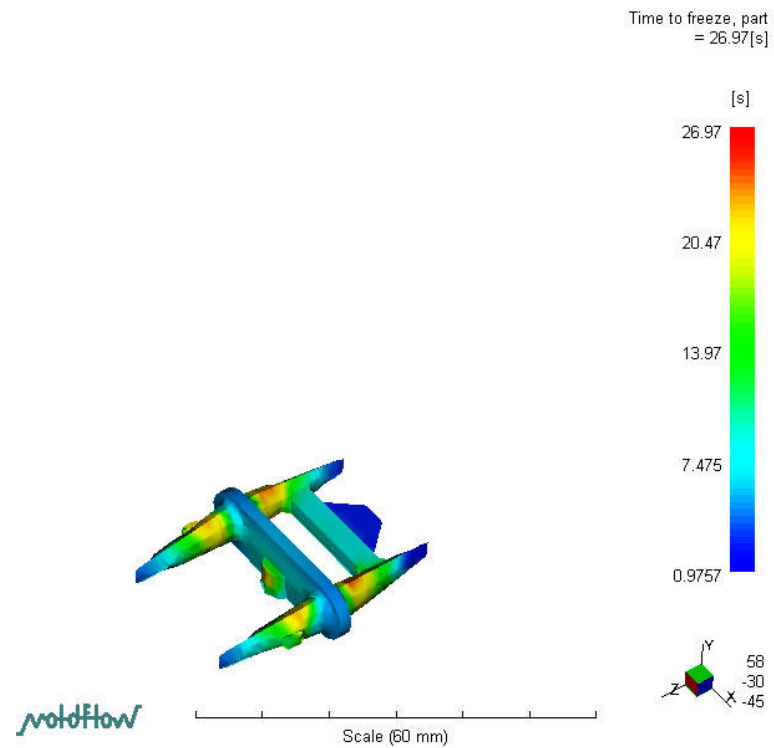


Figura 4.9 – Tempo de solidificação “Engate plástico”

4.1.4 Campo de pressões no fim do enchimento

A variação de pressões ao longo das 3 peças é pequena, pelo que não são esperados empenos ou distorções nas peças.

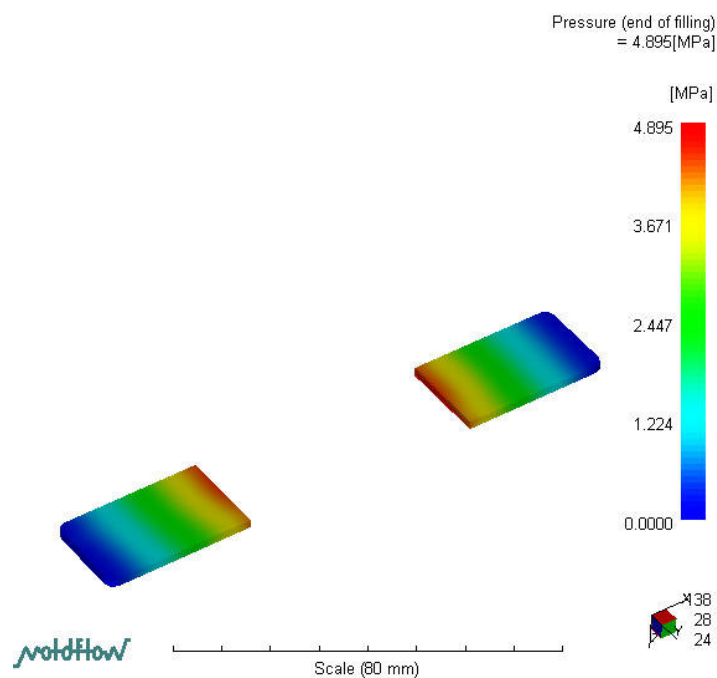


Figura 4.10 – Campo de pressões no fim do enchimento “Placa”

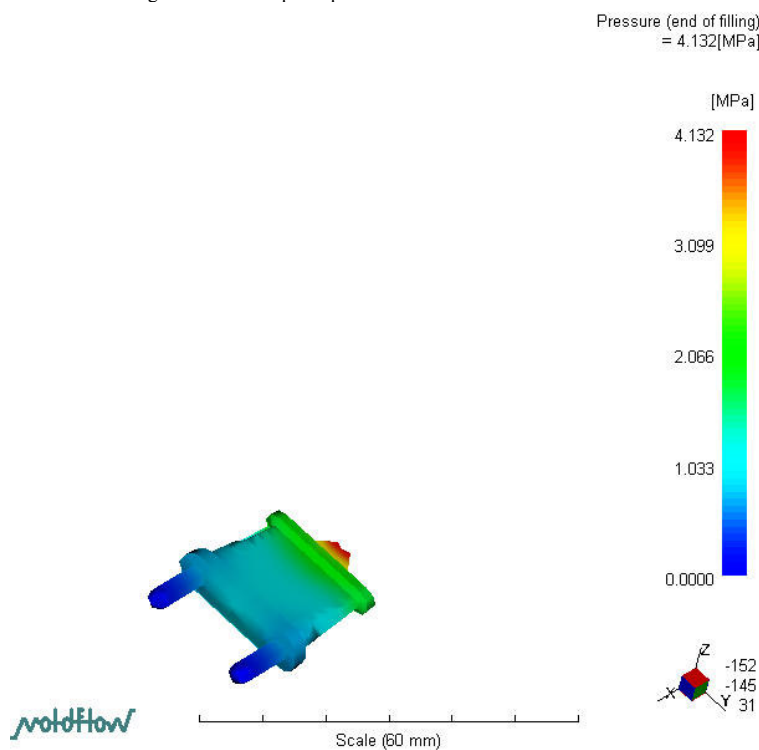


Figura 4.11 – Campo de pressões no fim do enchimento “Ficha”

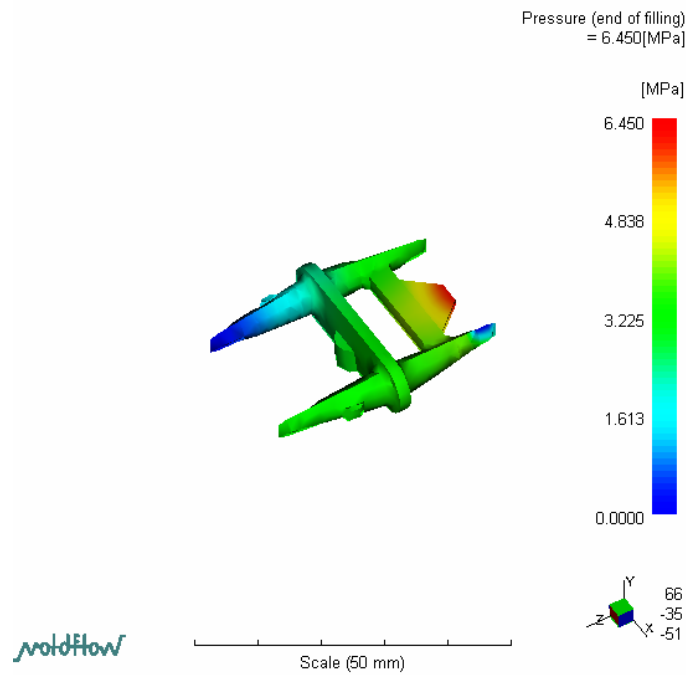


Figura 4.12 – Campo de pressões no fim do enchimento “Engate plástico”

4.1.5 Contração volumétrica

Na “placa” não é expectável o aparecimento de chupados, pois os valores da contração são uniformes ao longo da peça. Já na “ficha” existe a possibilidade de ocorrer chupados na zona mais espessa, pois os valores da contração nesta zona são bastante superiores em relação ao resto da peça. No “engate” também puderam ocorrer pequenos chupados localizados nas zonas mais espessas da peça.

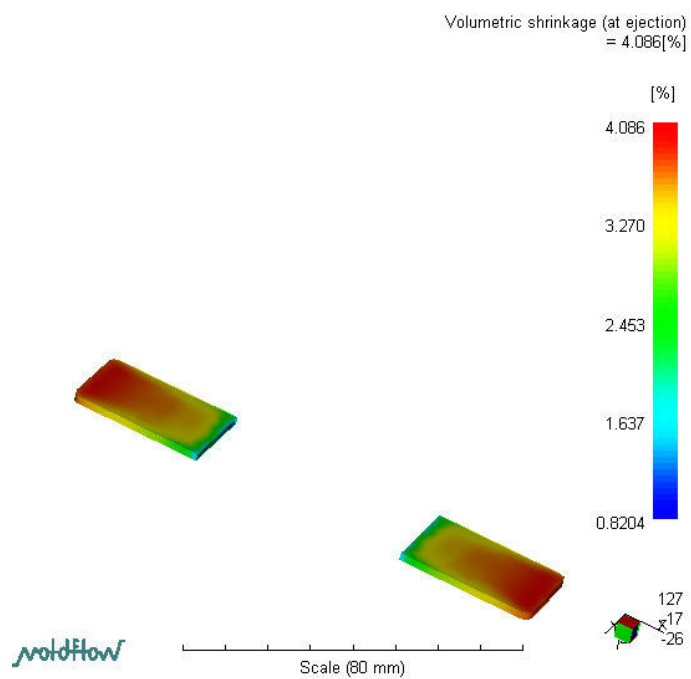


Figura 4.13 – Contracção volumétrica “placa”

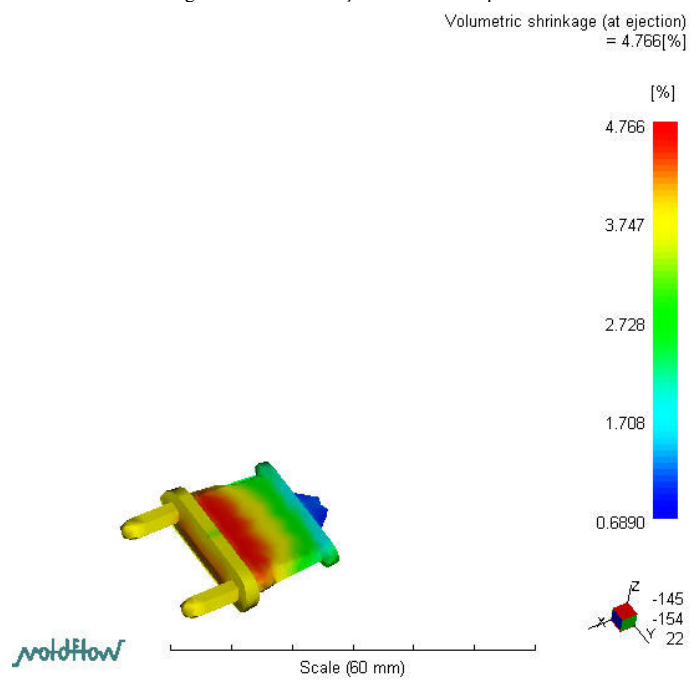


Figura 4.14 – Contracção volumétrica “ficha”

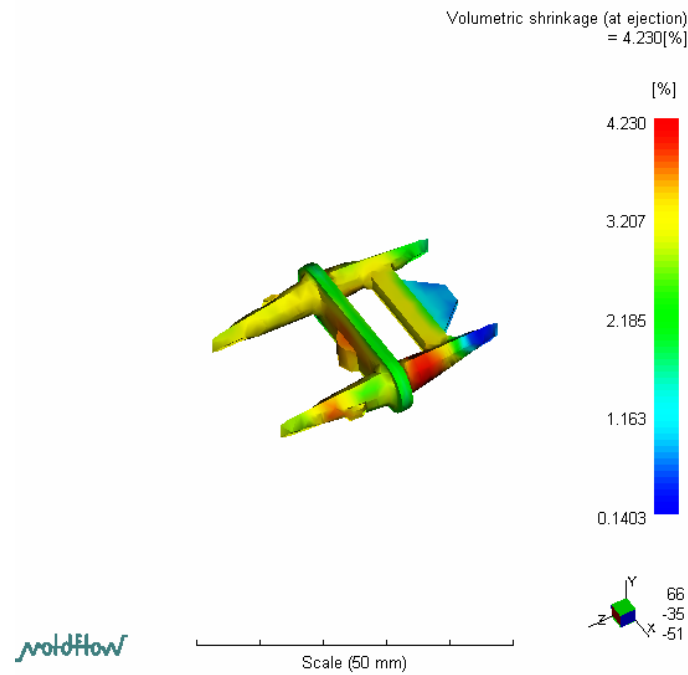


Figura 4.15 – Contracção volumétrica “engate plástico”

4.2 Injecção das peças

4.2.1 Peça “Placa”

4.2.1.1 Postiços maciços

Com os postiços maciços, foram feitas **42** injecções, obtendo-se em cada uma 2 placas. As peças apresentavam sempre os mesmos defeitos. De um lado, a peça não enchia completamente e do outro tinha excesso de rebarba. Também do lado que tinha mais rebarba aderida mais ao postigo de SL, sendo a sua extracção mais difícil, pelo que partia muitas vezes ao ser extraída. Este defeito resulta da falta de alinhamento dos postiços de SL. A peça que não encheu completamente também apresenta chupados provocados pela ausência da 2ª pressão. Nota-se que os canais no postigo de Alumínio são maiores que no postigo de SL, pelo que o material penetra na zona de transição entre o SL e o alumínio, resultado da folga existente entre estes 2 postiços, o que dificulta depois a sua extracção (Figura 4.16).

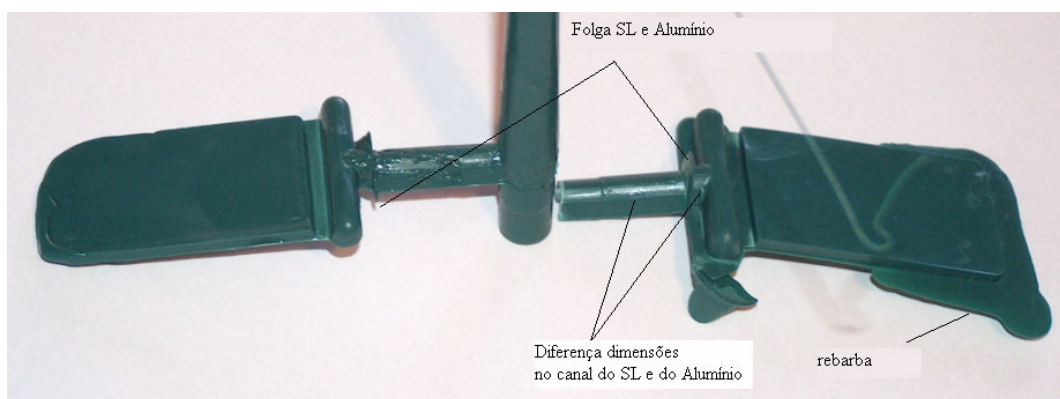


Figura 4.16 – Defeitos na “placa” após extracção



Figura 4.17 – Peça com chupados

Utilizando outro conjunto de postigos maciços, à 7ª injeção, o postigo de SL partiu na zona do ataque em lâmina. Na Figura 4.18 pode ver-se a parte do postigo de SL que ficou aprisionado na peça injectada.



Figura 4.18 – Peça com o SL partido



Figura 4.19 – Postigo SL partido no ataque

O postigo de SL da cavidade foi trocado e foram injectadas mais **100** peças.

4.2.1.2 Postigos com 2mm de casca

Foram utilizados 4 postigos de casca com 2mm de espessura. Para afinar a máquina foram experimentados vários valores para a 2ª pressão e para o ponto de comutação. A Tabela 4-1 apresenta esses valores e o resultado nas peças injectadas.

Tabela 4-1 – Parâmetros durante a afinação

2ª Pressão (bar)	Comutação (mm)	Resultado	Figura
0	11	Peça não cheia – chupados	Figura 4.20
12	11	Peça cheia mas muito deformada	Figura 4.21
7	11	Peça menos deformada mas não cheia	Figura 4.22
7	12	Peça cheia, menos deformada que nos casos anteriores, mas num dos lados apresenta sempre uma deformação. O postigo de SL já está deformado. A peça sai com rebarba.	Figura 4.23



Figura 4.20 – 2ª pressão 0 Switch 11

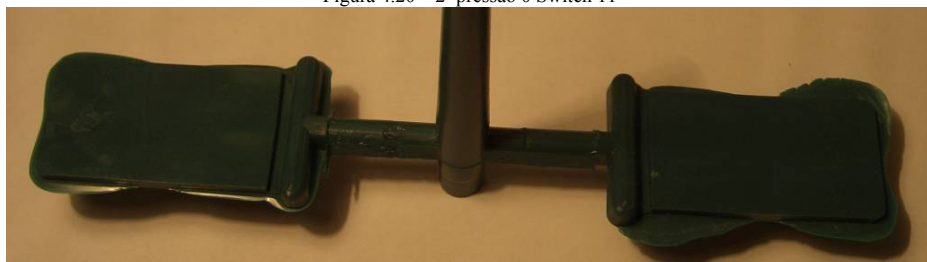


Figura 4.21 – 2ª pressão 12 Switch 11

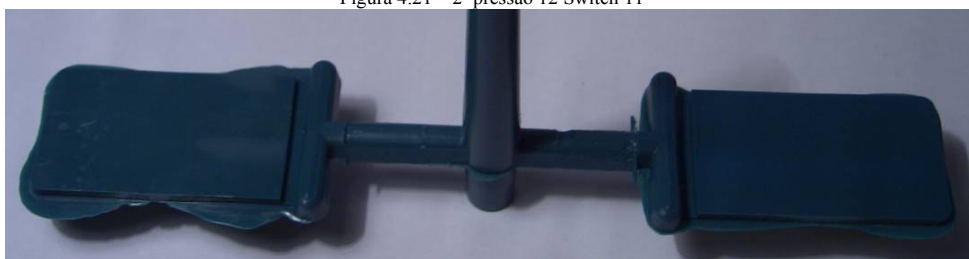


Figura 4.22 – 2ª pressão 7 Switch 11



Figura 4.23 – 2ª pressão 7 Switch 12

Depois de afinada a máquina foram feitas **52** injeções. As peças apresentavam sempre uma marca em forma de cruz coincidente com a zona em que os postigos têm reforço (Figura 3.16). Nesta zona, as peças têm menor espessura. Numa das placas rectangular este defeito era mais acentuado.

Mesmo alterando alguns parâmetros nunca foi possível eliminar a rebarba (Figura 4.24).



Figura 4.24 – Peça com rebarba

Nas zonas em que o postigo de SL contacta com a rebarba das peças injectadas, este apresenta arrancamentos de material na aresta (Figura 4.25).

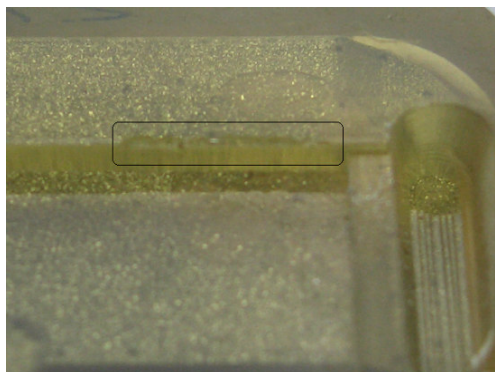


Figura 4.25 – Deterioração da aresta do SL

4.2.1.3 Postigos com 3mm de casca

A obtenção de 2 placas em cada injeção, revelou não ser adequada, pois o ajustamento dos vários postigos de SL é bastante problemático. Verificou-se sempre que uma das peças sofria mais deformação e tinha mais rebarba que a outra. O alimentador foi modificado de forma a só se obter 1 placa rectangular por injeção e portanto só se utilizaram 2 postigos de SL em casca de 3mm. Foram injectadas 120 peças.



Figura 4.26 – Obtenção de apenas 1 peça por injeção

4.2.1.4 Desempenho térmico

Na Figura 4.27 são apresentadas as curvas de temperatura tipo obtidas com os termopares T1 e T2, para uma temperatura de início de ciclo de 40°C e para um tempo de arrefecimento com o molde fechado de 40s.

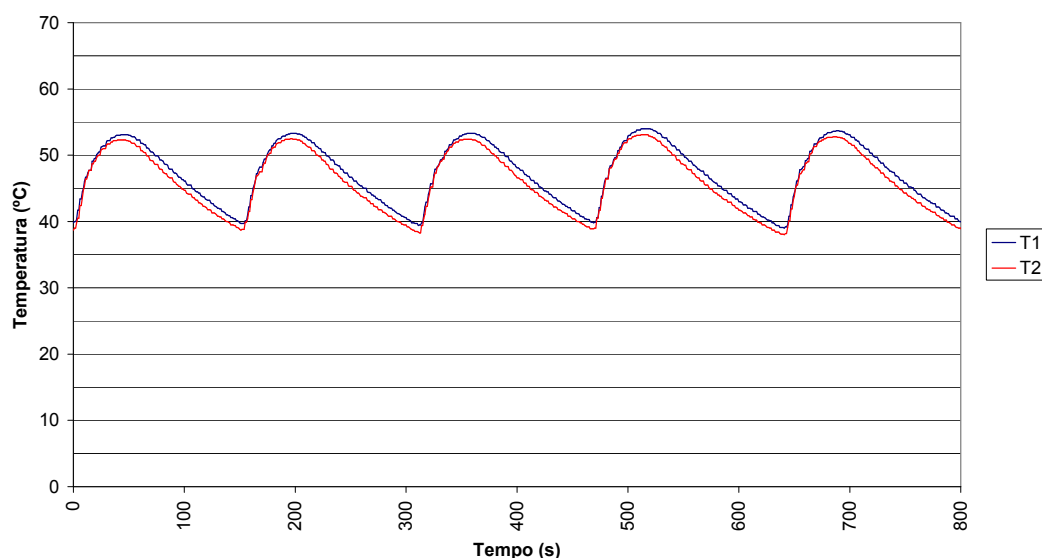


Figura 4.27 – Curvas experimentais nos termopares T1 e T2 para uma temperatura de início de ciclo de 40°C e para um tempo de arrefecimento com o molde fechado de 40s

As temperaturas dos termopares T1 e T2 vão ser comparada com simulações em nós próximos dos sensores para os mesmos tempos de arrefecimento com o molde fechado e temperaturas de início de ciclo. A Tabela 4-2 mostra as combinações desses 2 parâmetros e as figuras correspondentes.

Tabela 4-2 – Esquema da combinação da temperatura de início de ciclo e do tempo de arrefecimento com o molde fechado

Temperatura de início de novo ciclo [°C]	Tempo de arrefecimento com molde fechado [s]
40	—
	40
	45
45	35
	40
	45
50	35
	40
	45
55	35
	40
	45

Da análise dos vários gráficos (Figura 4.28 à Figura 4.31), é visível que a simulação atinge temperaturas superiores às das curvas experimentais. Esta situação ocorreu, mesmo considerando uma temperatura inicial de 200°C para a simulação em ALGOR, quando a temperatura de injeção foi de 230°C. Esta situação resulta, provavelmente da deficiente colocação dos termopares. Estes não devem ter ficado a uma distância de 2mm da superfície e a cola criou uma camada isolante, o que fez com que as temperaturas medidas pelos termopares fossem sempre inferiores às das simulações numéricas.

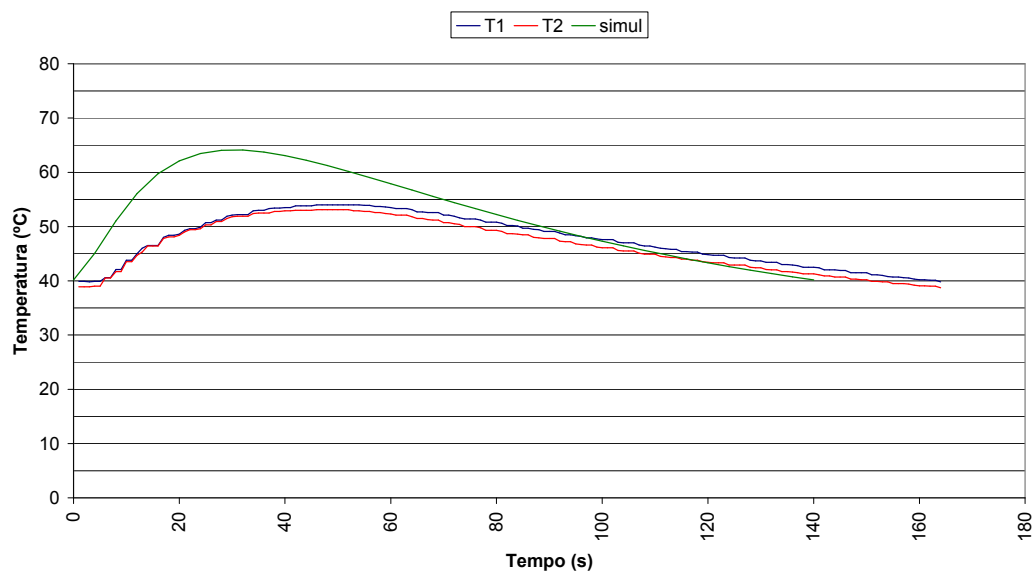


Figura 4.28 – Temperatura de início de ciclo 40°C tempo arref. molde fechado 40s

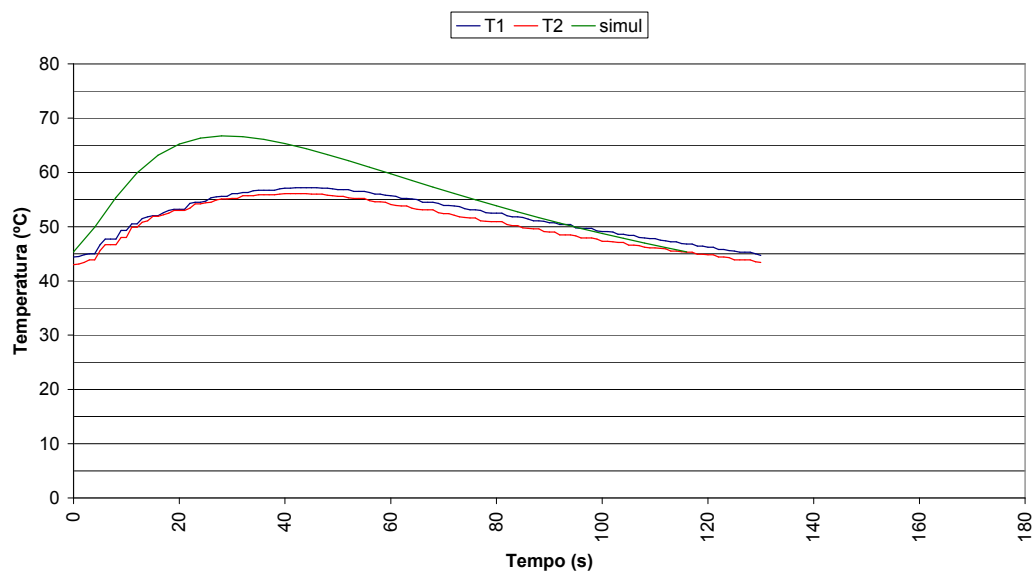


Figura 4.29 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 35s

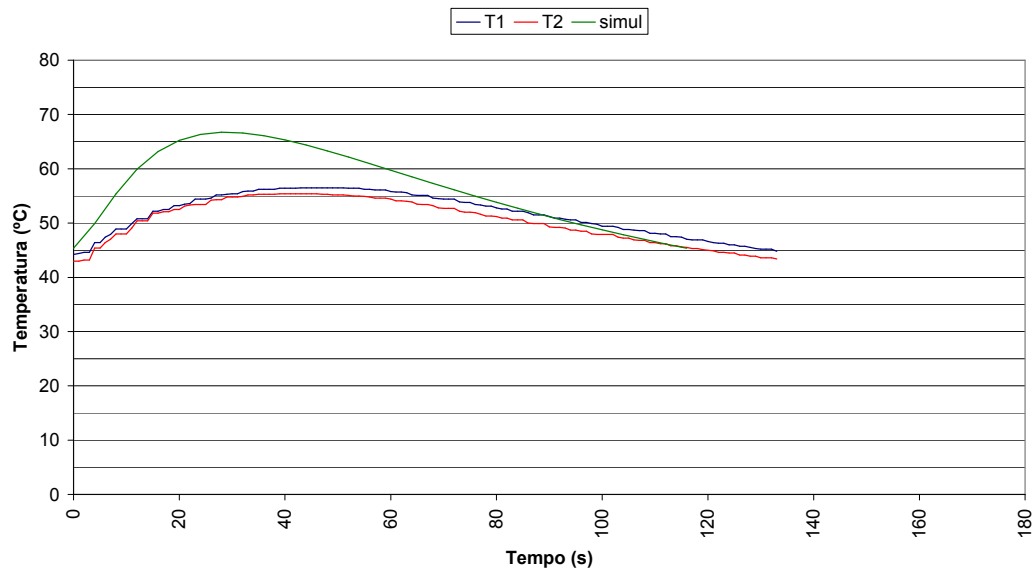


Figura 4.30 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 45s

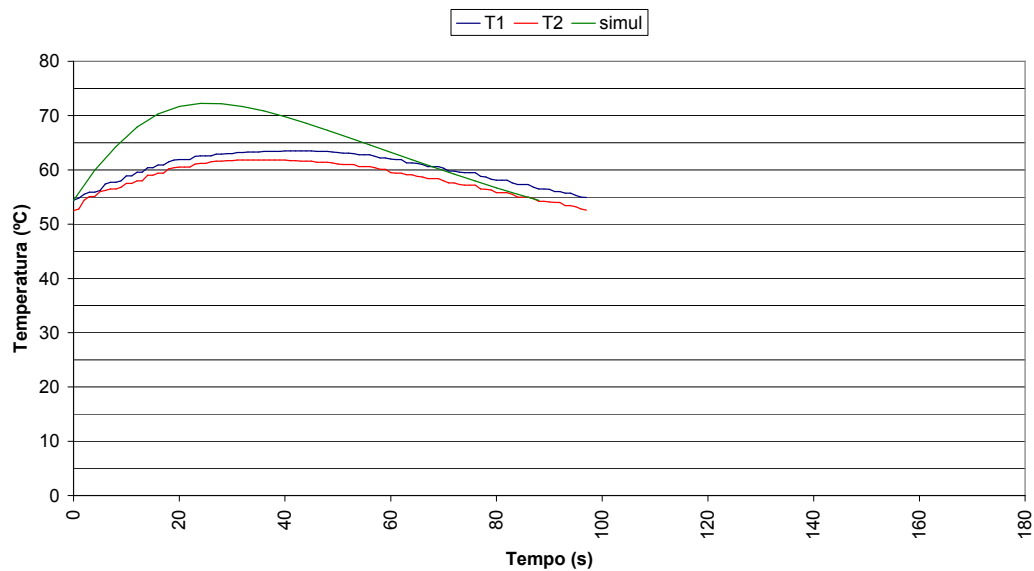


Figura 4.31 – Temperatura de início de ciclo 55°C tempo arref. molde fechado 40s

A partir das curvas de temperatura do termopar T1, vamos analisarmos a influência da temperatura de início de um novo ciclo. Para isso foi construído um gráfico com o tempo de ciclo em função da temperatura de início de ciclo para vários tempos de arrefecimento com o molde fechado (Figura 4.32).

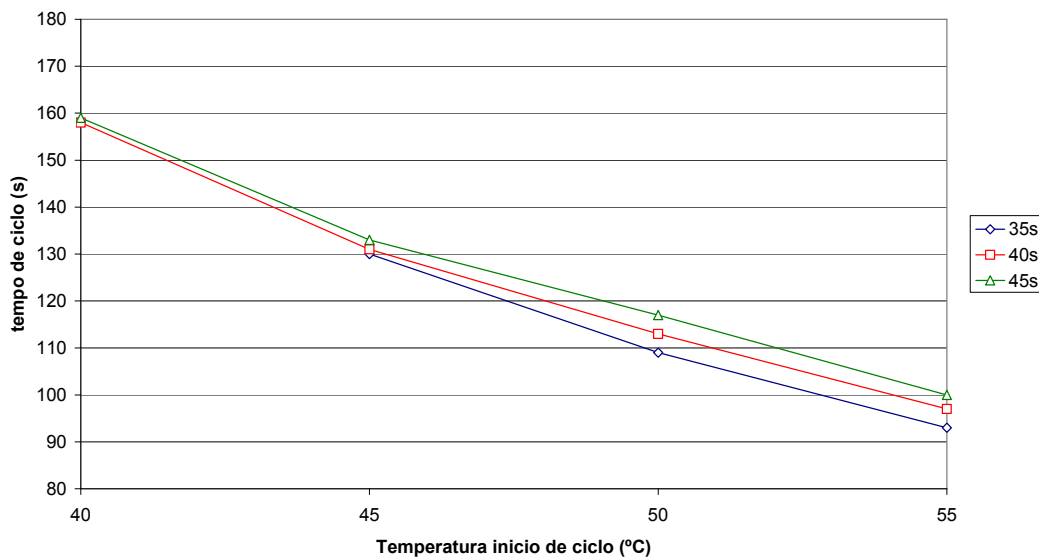


Figura 4.32 – Tempo de ciclo em função da temperatura de início de ciclo para vários tempos de arrefecimento com molde fechado

O tempo de ciclo decresce linearmente com o aumento da temperatura de início de novo ciclo. Para as temperaturas de início de ciclo de 50 e 55°C, há uma ligeira diminuição do tempo de ciclo com a diminuição do tempo de arrefecimento com o molde fechado (Figura 4.32). Para uma temperatura de início de ciclo de 50°C passando de um tempo de arrefecimento com o molde fechado de 45 para 35s, temos uma diminuição do tempo de ciclo de 8s (117-109). Para a temperatura de 55°C já a redução é de 7s (100-93).

Para um tempo de arrefecimento com o molde fechado de 35s, se aumentarmos a temperatura de início de ciclo de 45 para 55s (22.2%), temos uma diminuição do tempo de ciclo de 130 para 93s, o que corresponde a uma diminuição de 28.5%.

Com o aumento da temperatura de início de ciclo verificou-se que as peças aderiam à superfície dos postigos e consequentemente à sua degradação. Para temperaturas de 40°C as peças não aderiam aos postigos.

Quando se aumenta a temperatura de início de ciclo há uma diminuição do tempo de ciclo, mas o postigo atinge uma temperatura superior, pois quando se inicia a injeção este está a uma temperatura superior. A variação da temperatura máxima com a temperatura de início é praticamente linear (Figura 4.33).

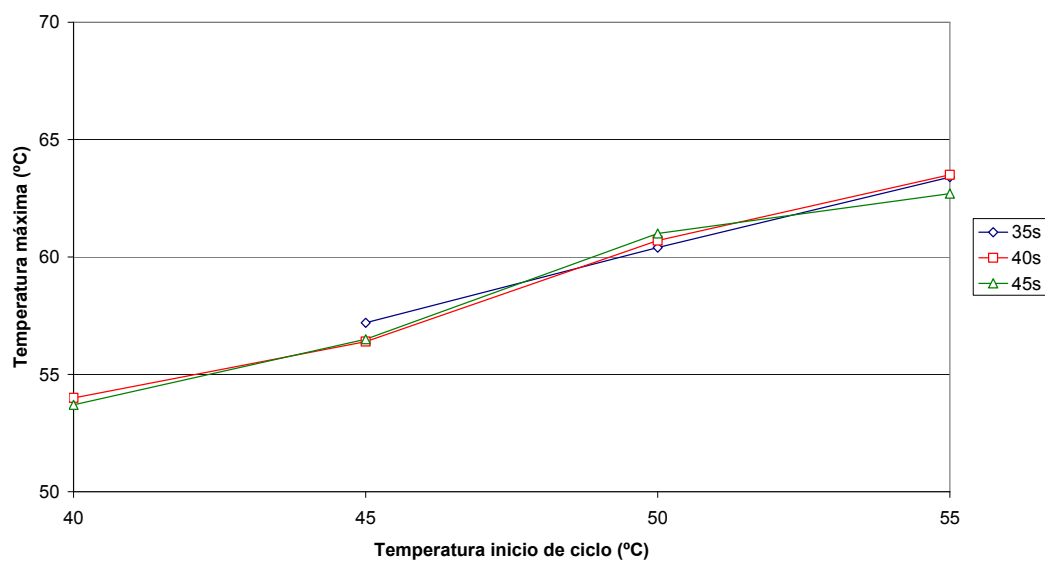


Figura 4.33 – Temperatura máxima em função da temperatura de início de ciclo para vários tempos de arrefecimento com molde fechado

4.2.2 Peça “Ficha eléctrica”

Para o caso da peça “Ficha Eléctrica” foram injectadas 118 peças em Lacqrene 4241 até à deterioração do molde. As primeiras peças apresentavam-se cheias e com pouca rebarba. Ao longo do processamento as peças começaram a apresentar alguns chupados nas zonas mais espessas. Foi possível reduzir estes chupados, mas as peças começaram a apresentar mais rebarba na linha de partição do molde devido ao aumento da pressão.



Figura 4.34 – Aparecimento de rebarba na linha de partição ao longo do tempo

4.2.2.1 Desempenho térmico

As moldações foram injectadas em poliestireno Lacqrene 4241 a 240°C. O tempo de ciclo, o tempo de injeção, o tempo de 2ª pressão, o tempo de arrefecimento com o molde fechado e o tempo com o molde aberto, variaram como mostrado na Tabela 4-3. As restantes condições de processamento estão indicadas no Anexo B B.2.2

Tabela 4-3 – Variação dos tempos de ciclo para “ficha”

tempo injeção (s)	1.7	1.7	1.7	1.7
tempo 2ª pressão (s)	10	10	10	10
tempo arref. molde fechado (s)	80	110	160	190
tempo molde aberto (s)	8.3	8.3	8.3	8.3
soma	100	130	180	210

A Figura 4.35 mostra as curvas da temperatura dos 4 termopares para tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s, após estabilização.

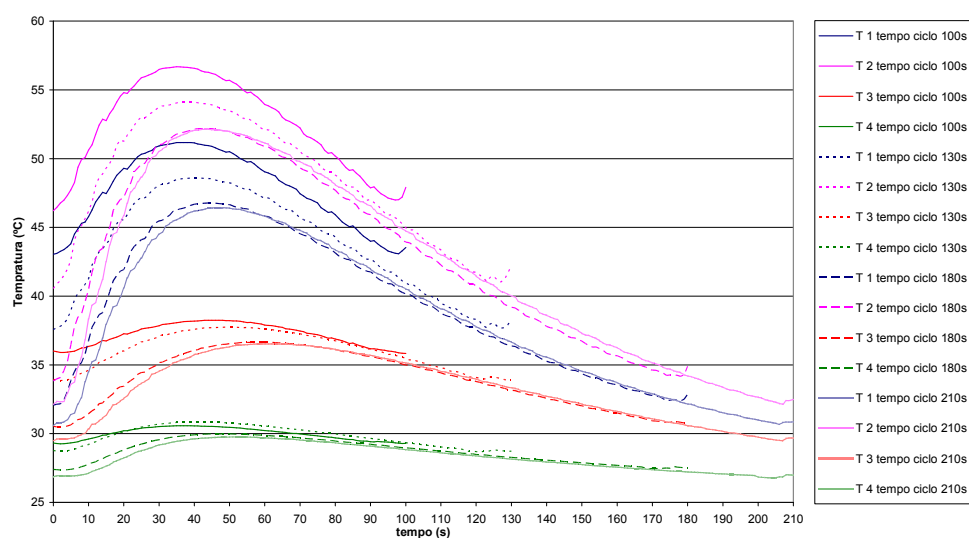


Figura 4.35 – “Ficha” temperaturas nos 4 termopares para tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s

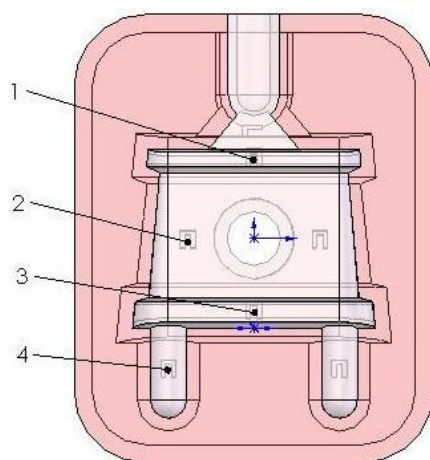


Figura 4.36 – Disposição dos termopares “ficha”

Da Figura 4.37 à Figura 4.40 estão representados os resultados obtidos por cada termopar para vários tempos de ciclo. Nos mesmos gráficos também estão representadas as temperaturas máximas em função do tempo de ciclo.

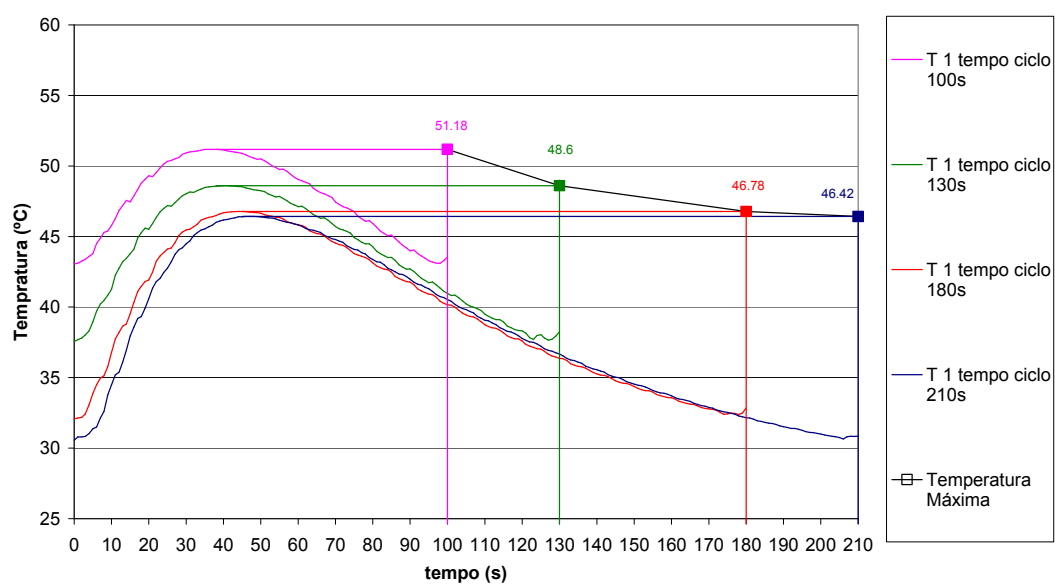


Figura 4.37 – “Ficha” temperatura do termopar T1 para vários tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s

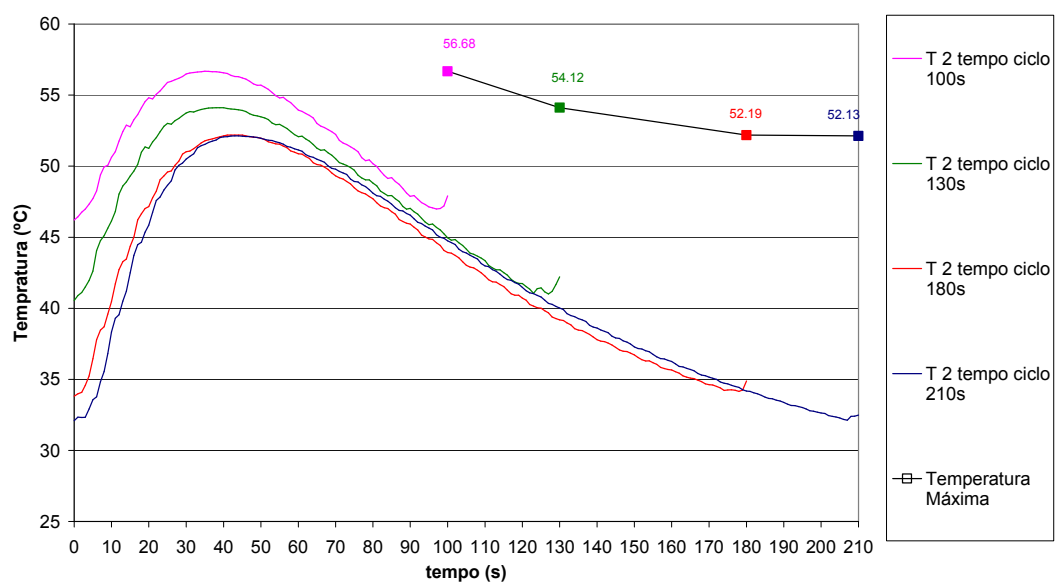


Figura 4.38 – “Ficha” temperatura do termopar T2 tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s

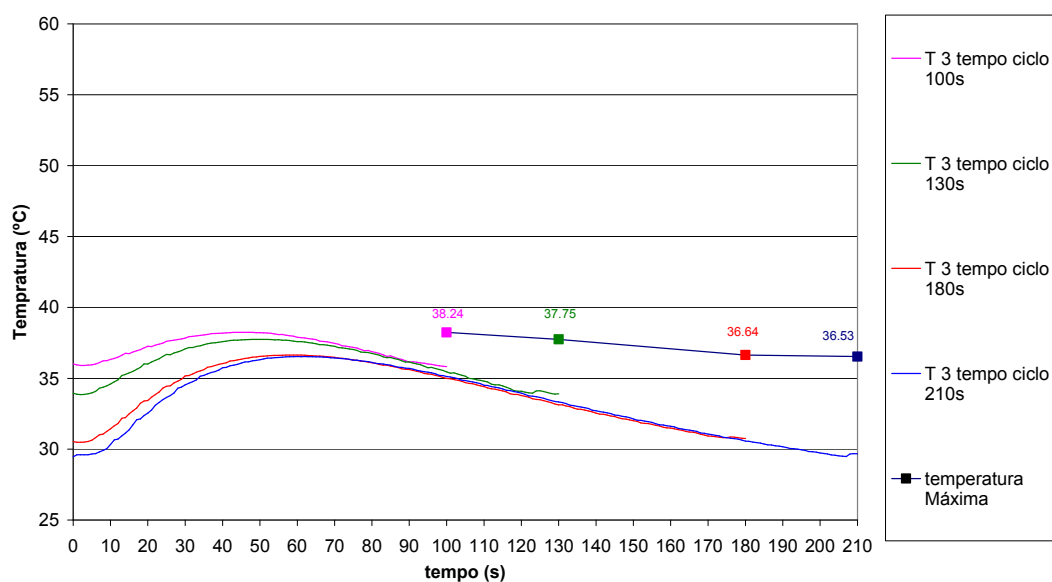


Figura 4.39 – “Ficha” temperatura do termopar T3 para vários tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s

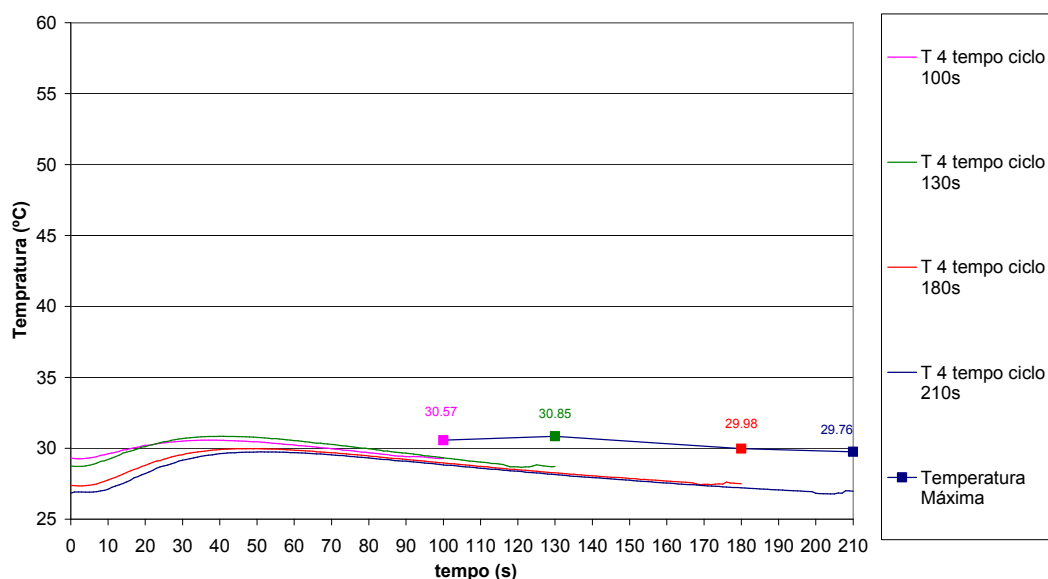


Figura 4.40 – “Ficha” temperatura do termopar T4 para vários tempos de ciclo de 100, 130, 180 e 210s

Da análise da Figura 4.37 e Figura 4.38 que representam as temperaturas dos termopares T1 e T2, onde as temperaturas atingem os valores mais elevados, é visível que o aumento do tempo de ciclo até aos 180s provoca uma descida na temperatura máxima. Com um tempo de ciclo de 210s, a temperatura máxima no termopar T1 é de 46,78°C, o que representa uma descida de 0,36°C em relação a um tempo de ciclo de 180s. Por este motivo a utilização de tempos de ciclo superiores a 180°C não trará vantagens.

4.2.2.2 Comparação experimental / simulação

Com a criação da malha no programa ALGOR, surgem vários nós na proximidade de cada alojamento dos termopares. O número dos nós na proximidade do alojamento T1 está representado na Figura 4.41

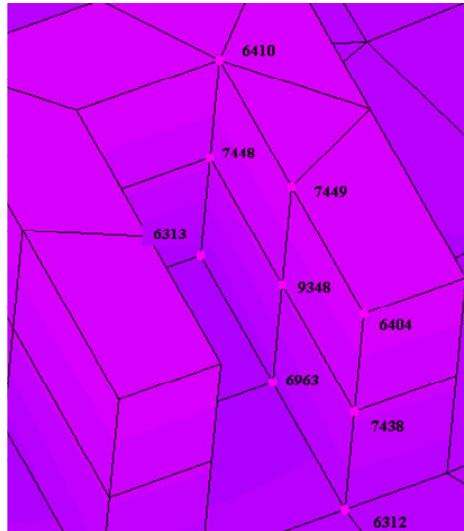


Figura 4.41 – “Ficha” nós na região do termopar 1

Para o termopar 1 foi comparada a curva experimental da temperatura com as curvas das simulações dos vários nós na proximidade do alojamento para um tempo de ciclo de 180s (Figura 4.42).

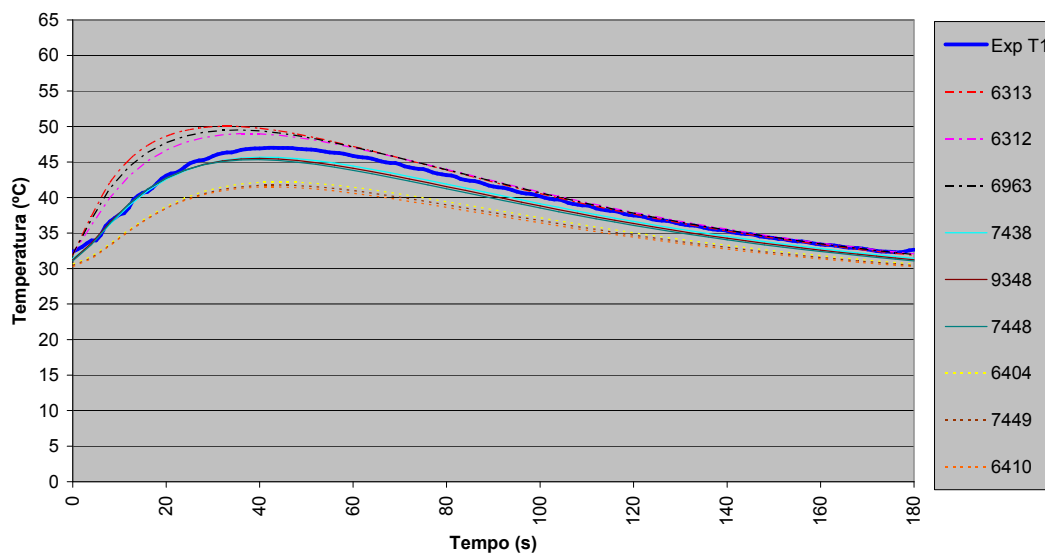


Figura 4.42 – “Ficha” comparação entre a curva experimental e as simulações para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 1

Na Figura 4.42 a curva a cheio é a curva experimental. As 3 curvas a traço misto são os nós mais próximos da superfície (Figura 4.41). As curvas a linha contínua representam os nós a uma altura intermédia do alojamento. As 3 curvas a traço interrompido dizem respeito aos nós mais afastados do alojamento.

Da análise da Figura 4.42 é visível que as curvas que mais se aproximam dos valores experimentais são as dos nós que estão a uma altura intermédia do alojamento (nó 7438, 9348 e 7448), representadas por uma linha contínua.

Por este motivo, foi decidido fazer novas simulações onde esteja representada uma pequena camada de cola. Para representar uma espessura de cola na montagem, como a condutibilidade da resina é próxima da condutibilidade das colas, foi desenhado um patamar de 0.5mm no alojamento dos termopares.

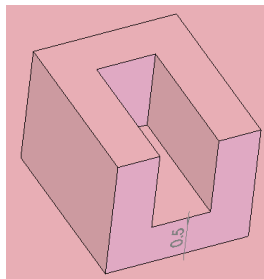


Figura 4.43 – Representação da cola com 0.5mm de espessura

Esta representação irá fazer com que o termopar não esteja na superfície, mas afastado de 0.5mm. A malha foi gerada novamente e refinada na proximidade dos alojamentos, para podermos ter nós no centro do alojamento. Na Figura 4.44 à Figura 8.53 são comparadas as curvas das simulações com as curvas experimentais para um tempo de ciclo de 180s.

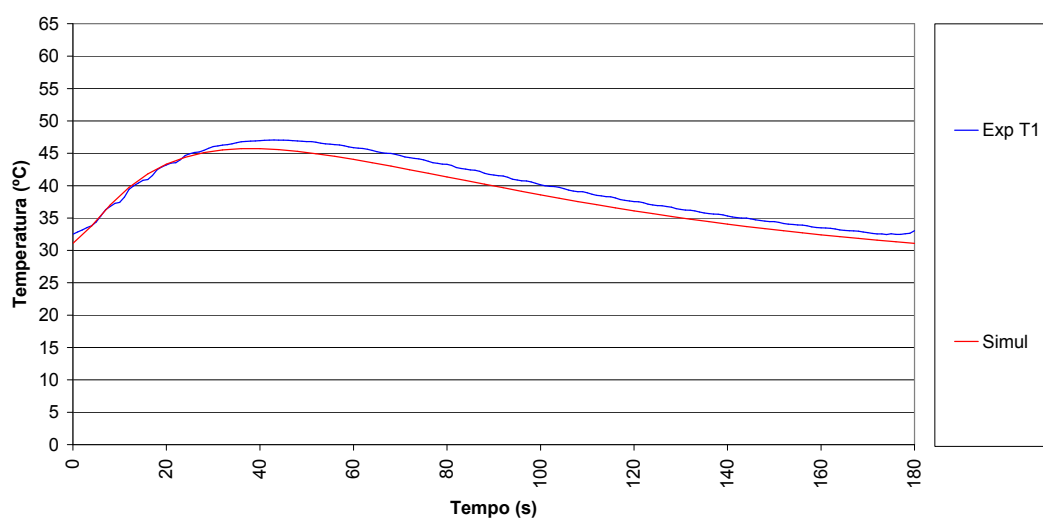


Figura 4.44 – “Ficha” comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 1

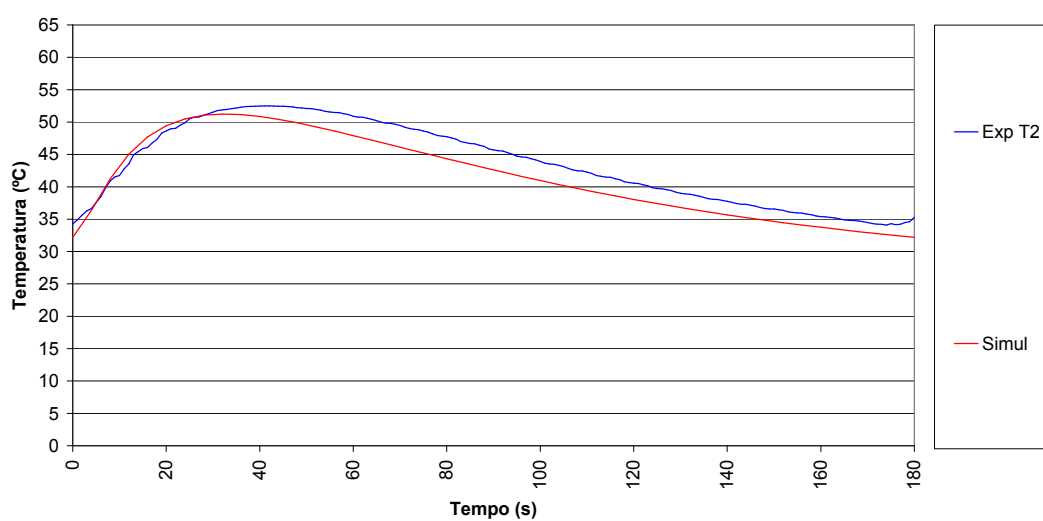


Figura 4.45 – “Ficha” comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 2

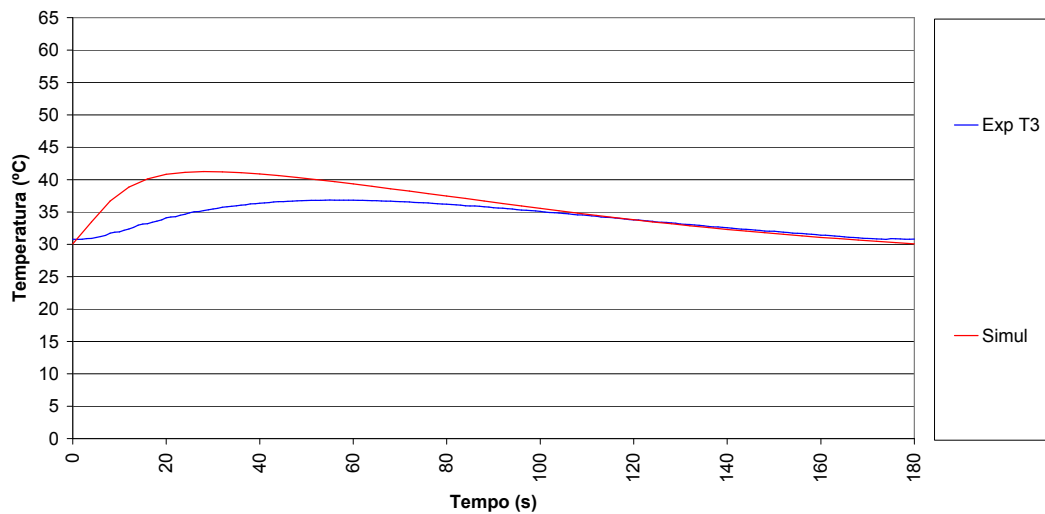


Figura 4.46 – “Ficha” comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 3

Nas zonas onde estão alojados os termopares 1 e 2, as novas simulações apresentam valores próximos das curvas experimentais. Este resultado vem reforçar a hipótese de a cola ter criado uma película isolante e de ter afastado o termopar da superfície.

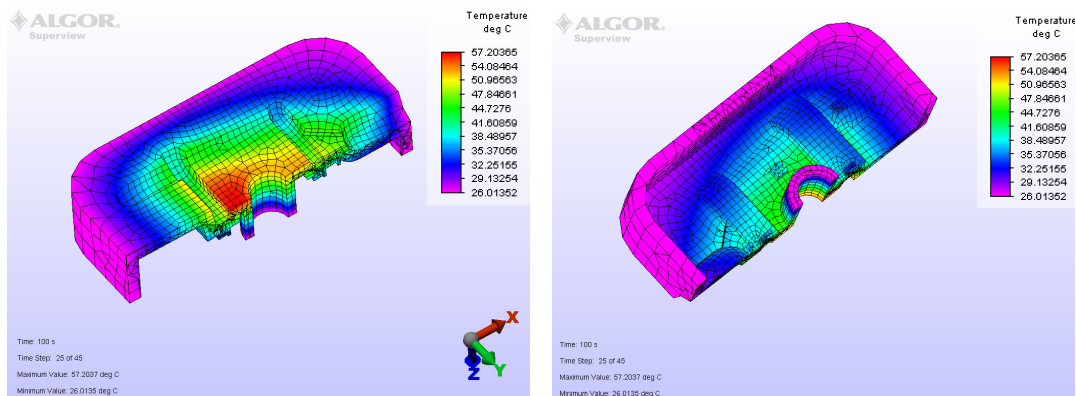
Na Tabela 4-5 são comparadas as temperaturas máximas das simulações com as das curvas experimentais. No termopar 2, que é onde se atingem as temperaturas mais elevadas, temos desvios de 2.37%. **Calculando as médias dos desvios** temos um valor médio de 5.7%.

Tabela 4-4 – “Ficha” Desvios da temperatura máxima das simulações em relação à curva experimental

T1	Simul (°C)	45.7
	Exp (°C)	47.0
	Desvio %	2.8
T2	Simul (°C)	51.2
	Exp (°C)	52.5
	Desv %	2.4
T3	Simul (°C)	41.2
	Exp (°C)	36.8
	Desv %	12.0

A comparação entre as curvas da simulação e as curvas experimentais, serviu para a validação do modelo de elementos finitos. Estas curvas foram obtidas em pontos na

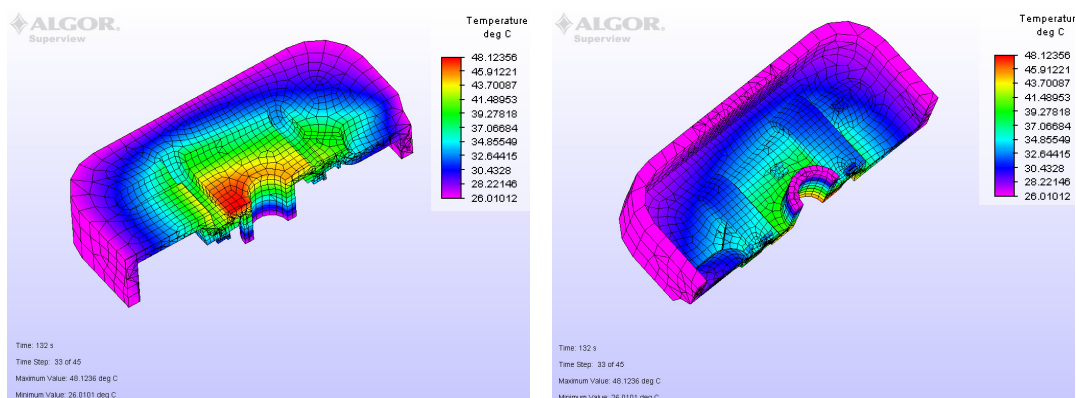
parte posterior dos postigos de SL. Com o modelo de elementos finitos podemos estudar o comportamento térmico de todo o postigo, nomeadamente de pontos na superfície moldante. Na Figura 4.49 à Figura 4.47 são mostrados os gradientes de temperatura do postigo de SL aos instantes de 100, 132 e 180s, para um ciclo de 180s.



a) Frente

b) Traseira

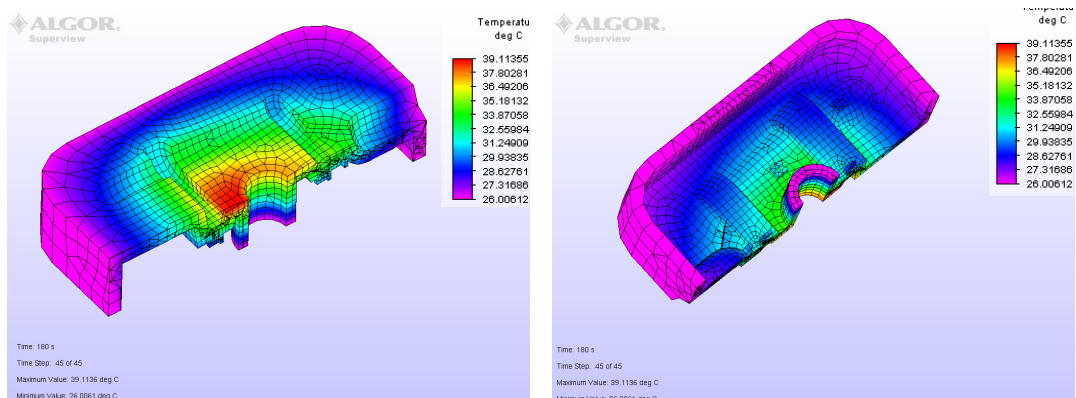
Figura 4.47 – “Ficha” temperatura aos 100s



a) Frente

b) Traseira

Figura 4.48 – “Ficha” temperatura aos 132s



a) Frente

b) Traseira

Figura 4.49 – “Ficha” temperatura aos 180s

Aos 180s todo o postigo de SL está a uma temperatura inferior a 40°C (Figura 4.49). Na Figura 4.51 é mostrada a evolução da temperatura nos 5 pontos da superfície do postigo de estereolitografia da Figura 4.50.

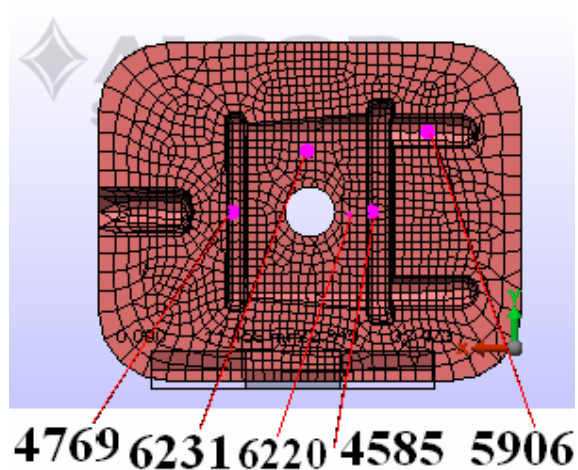


Figura 4.50 – “Ficha” pontos na superfície do SL

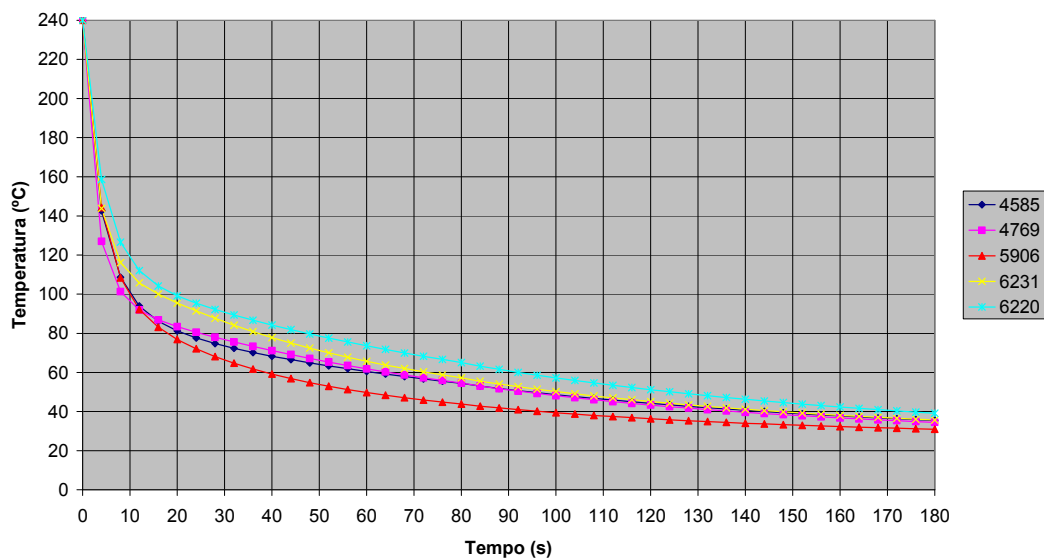


Figura 4.51 – “Ficha” temperatura dos pontos na superfície moldante do SL

4.2.3 Peça “Engate plástico”

Foram injectadas 36 peças em poliestireno Lacqrene 4241 à temperatura de **240°C** e 29 peças em polipropileno Borealis à temperatura de **230°C** sem que o molde se deteriorasse. As peças em poliestireno apresentaram sempre mais rebarba que as em polipropileno.



Figura 4.52 – Peça em Poliestireno



Figura 4.53 – Peça em Polipropileno

Nas peças em polipropileno aparecia um vazio na zona mais espessa (Figura 4.54). Para tentar eliminar esse vazio enchendo mais a peça na 2ª fase do ciclo começava a aparecer rebarba na linha de junta (Figura 4.55). Nas peças em poliestireno isso não era visível, mas o facto deste material não ser transparente como o polipropileno, pode ocultar este defeito.

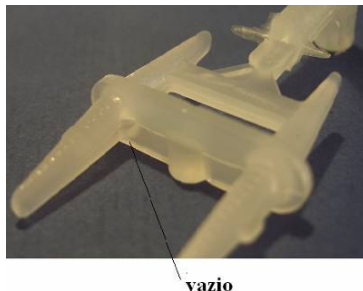


Figura 4.54 – Aparecimento de vazios

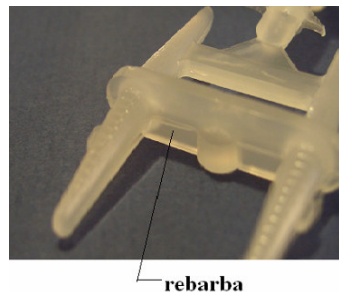


Figura 4.55 – Aparecimento de rebarba

4.2.3.1 Desempenho térmico (Registo das Temperaturas)

O tempo de ciclo, o tempo de injeção, o tempo de 2ª pressão, o tempo de arrefecimento com o molde fechado e o tempo com o molde aberto, variaram como mostrado na Tabela 4-5. As restantes condições de processamento estão indicadas no Anexo B B.2.3

Tabela 4-5 – Variação dos tempos de ciclo para “engate”

tempo injeção (s)	1.2	1.2	1.2
tempo 2ª pressão (s)	20	20	20
tempo arref. molde fechado (s)	104	154	204
tempo molde aberto (s)	4.8	4.8	4.8
soma	130	180	230

Foram registadas as temperaturas dos 5 termopares no molde de Accura para a injeção de poliestireno e de polipropileno, para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s, após estabilização

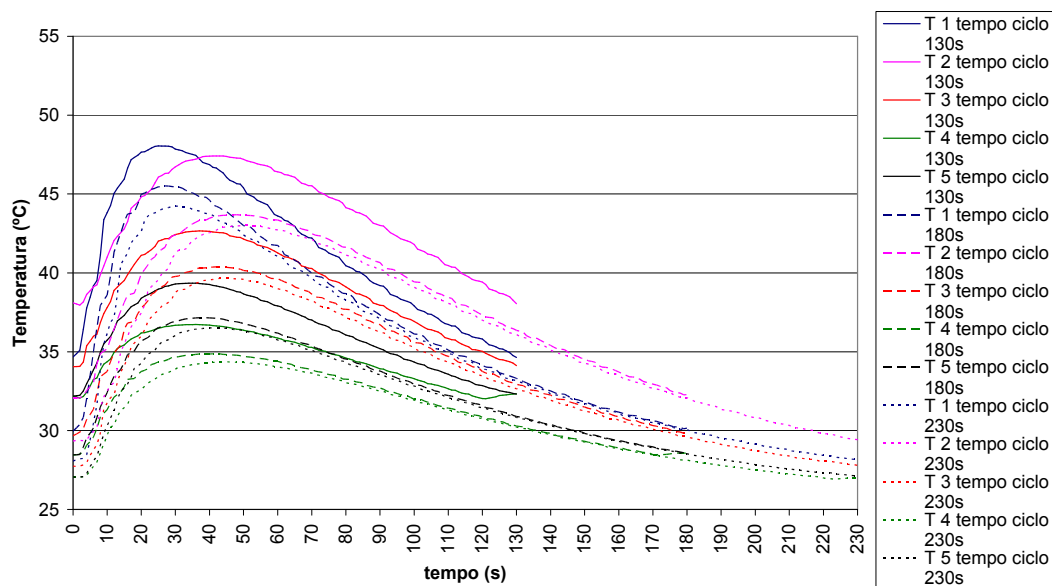


Figura 4.56 – “Engate” temperaturas injeção PS nos 5 termopares para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

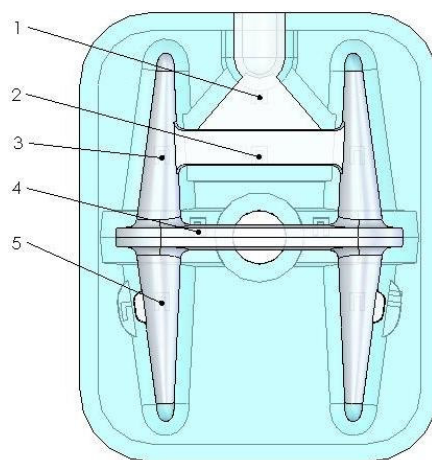


Figura 4.57 – Disposição dos termopares “engate plástico”

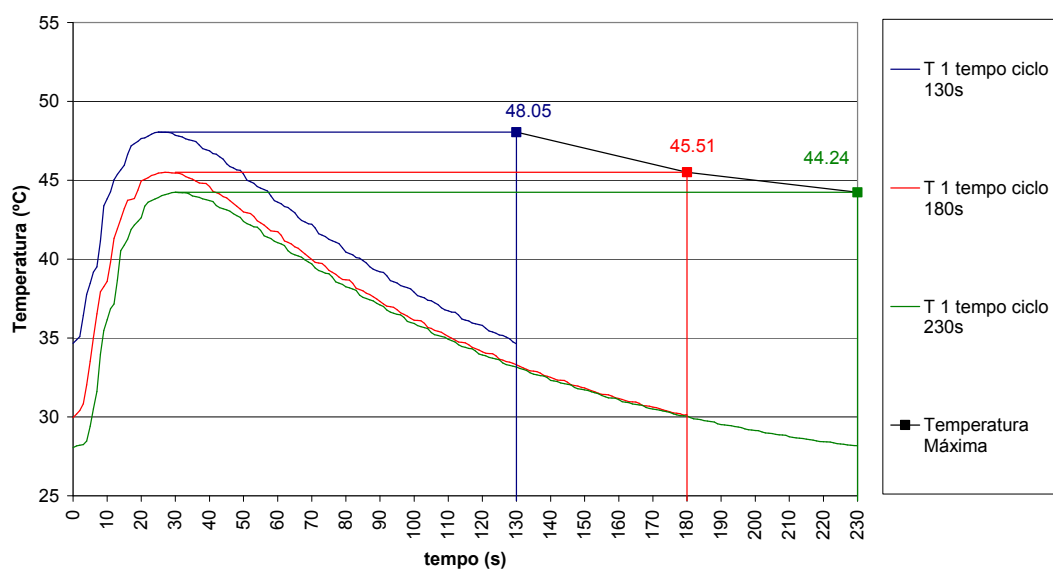


Figura 4.58 – “Engate” temperatura no termopar T1 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

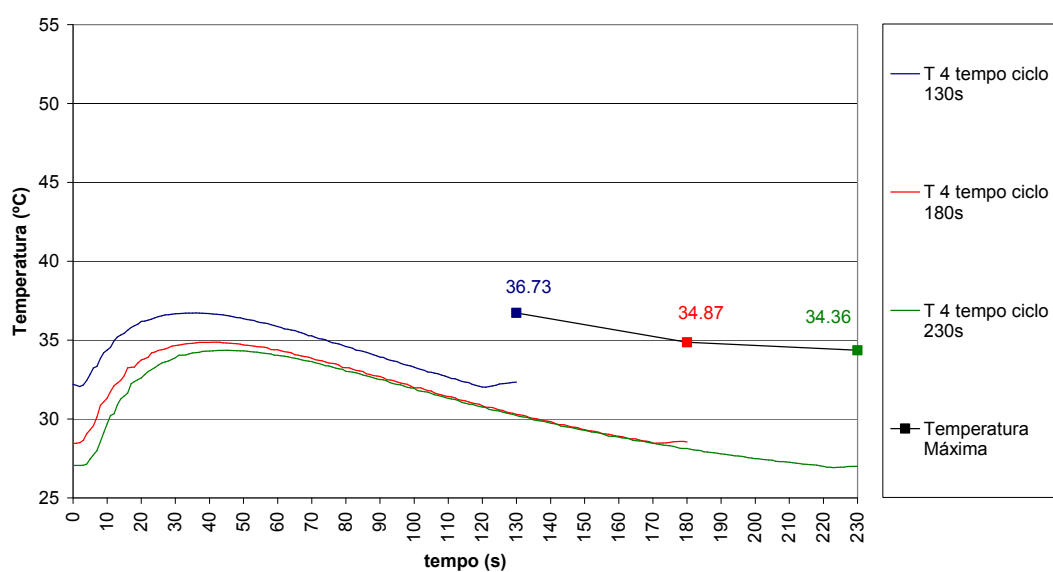


Figura 4.59 – “Engate” temperatura no termopar T4 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

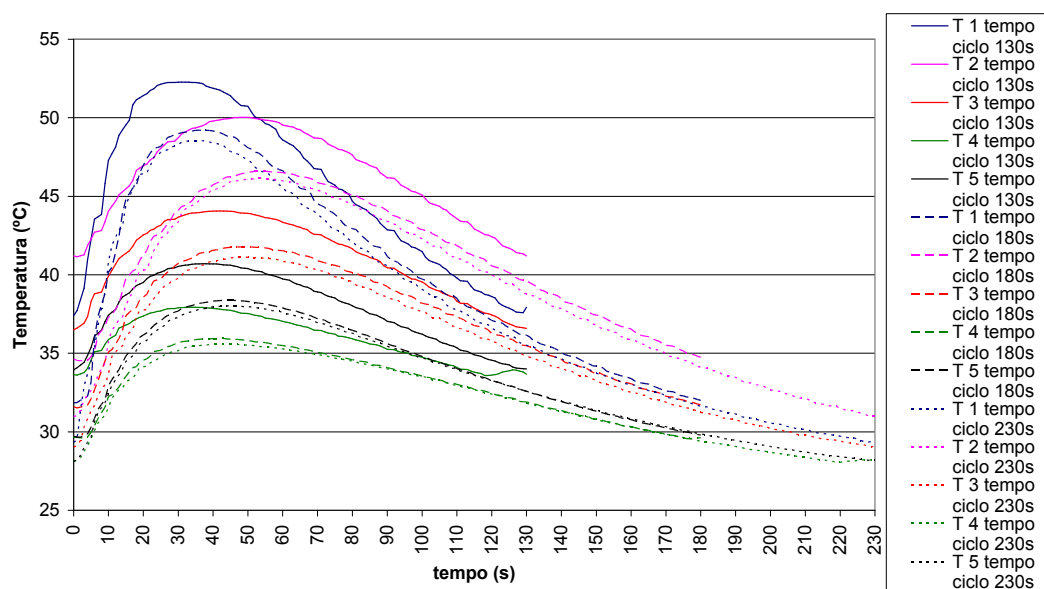


Figura 4.60 – “Engate” temperaturas injeção PP nos 5 termopares para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

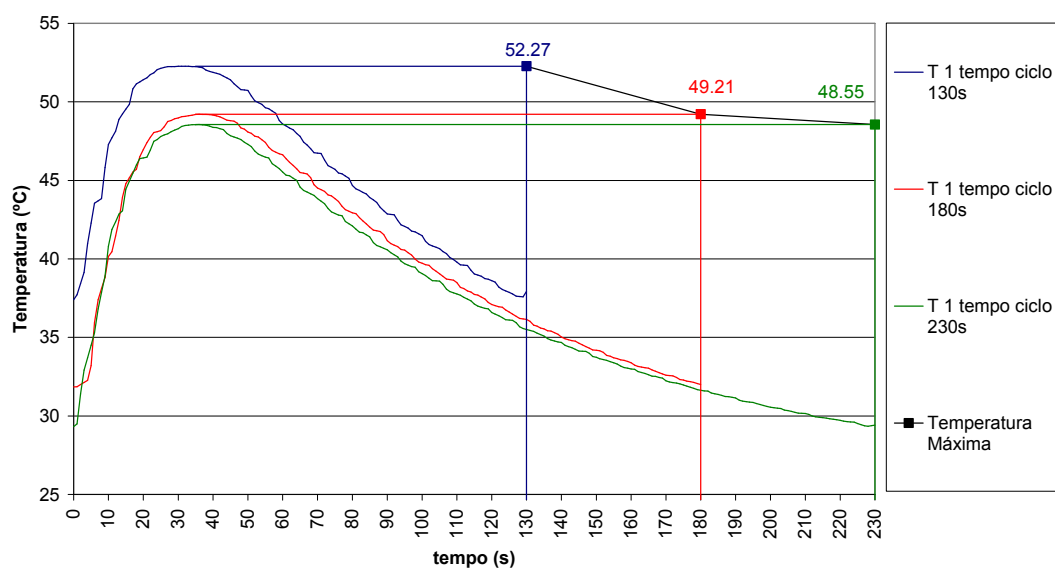


Figura 4.61 – “Engate” temperatura no termopar T1 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

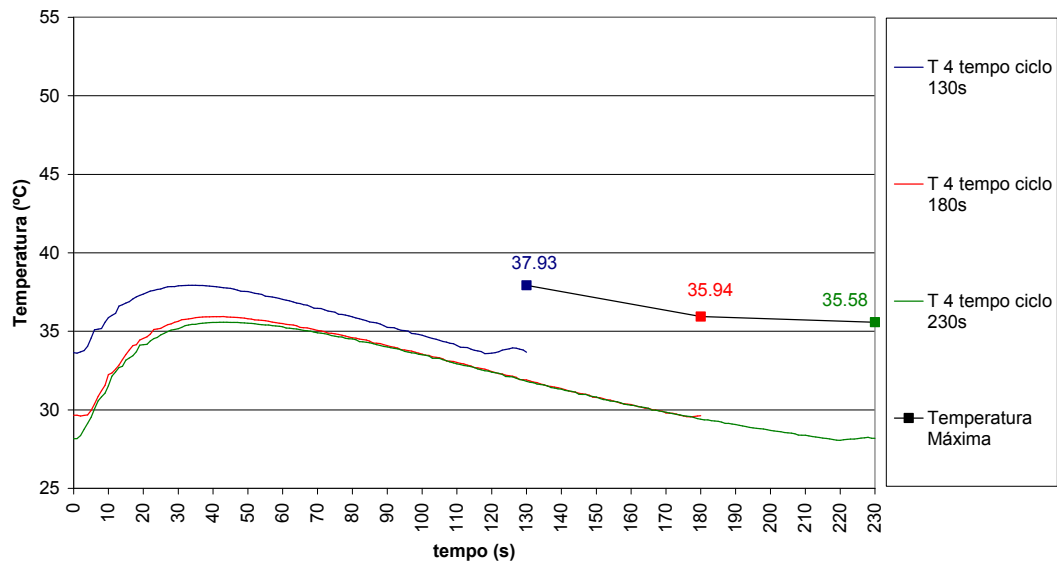


Figura 4.62 – “Engate” temperatura no termopar T4 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

Como no caso da “Ficha” tempos de ciclo superiores a 180s pouco reduzem a temperatura máxima para ambos os materiais.

Na Figura 4.63 à Figura 4.65 estão representadas as curvas das temperaturas dos termopares T1, T4 e T5, tanto para a injeção de PS como de PP. As curvas a contínuo representam a injeção de PS, enquanto as curvas a traço interrompido representam a injeção de PP. Os tempos de ciclo são representados por diferentes cores, sendo o tempo de 130s azul, o tempo de 180s vermelho e o tempo de 230s é verde. No mesmo gráfico estão representadas curvas com a temperatura máxima atingida durante o ciclo em função do tempo total de ciclo.

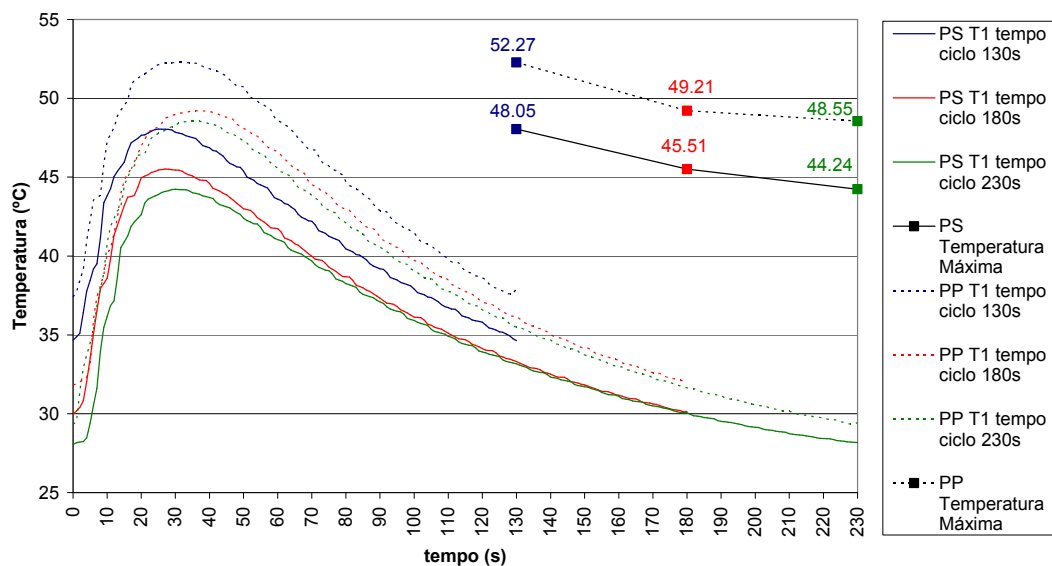


Figura 4.63 – “Engate” temperatura no termopar T1 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

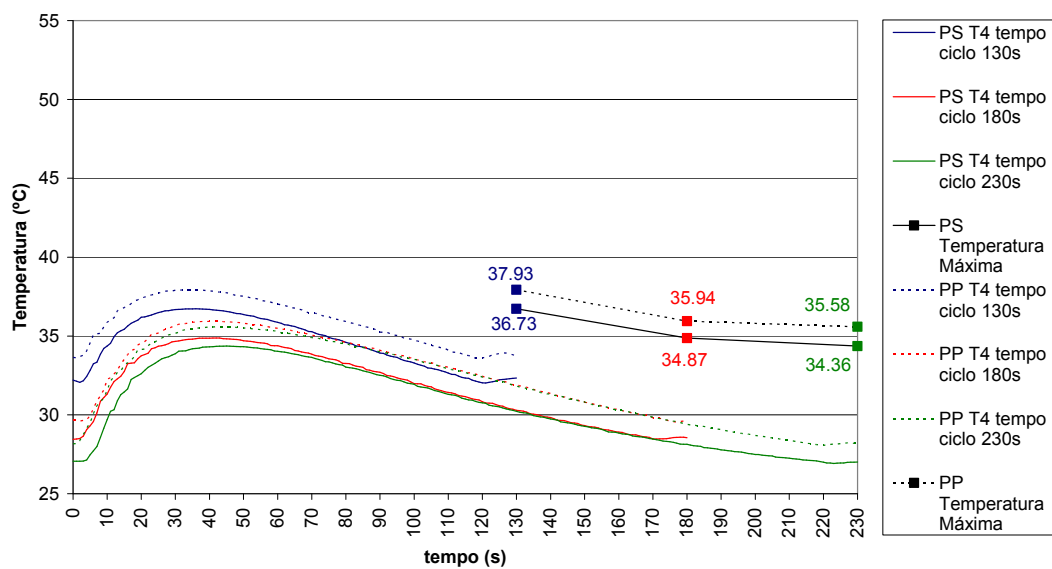


Figura 4.64 – “Engate” temperatura no termopar T4 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

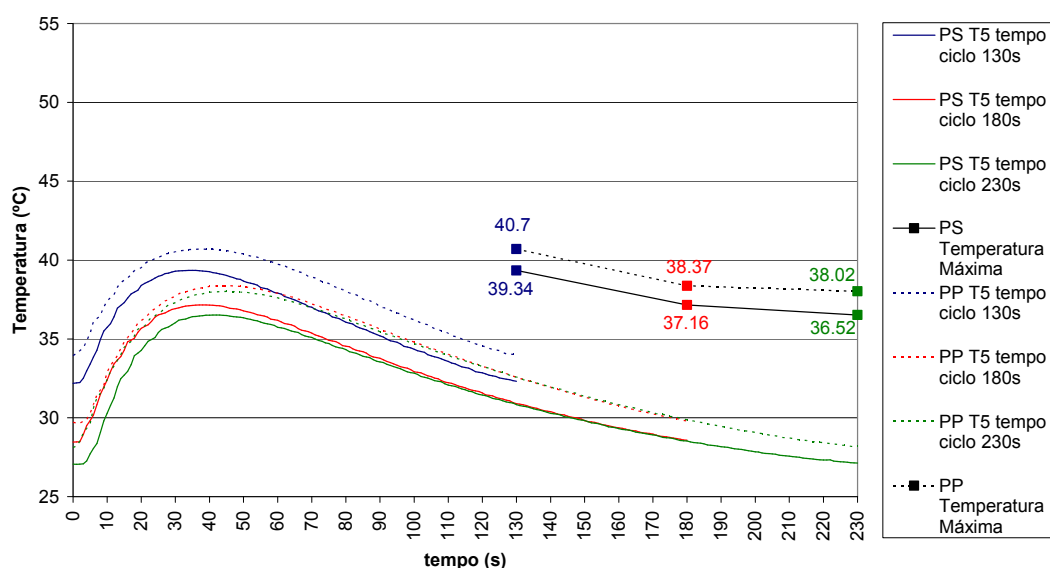


Figura 4.65 – “Engate” temperatura no termopar T5 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

Em todas as condições, as temperaturas máximas verificam-se para o caso do PP, apesar de este material ter sido injectado a uma temperatura de 230°C, sendo inferior à temperatura de injeção do PS que foi de 240°C. Se considerarmos as propriedades térmicas para o PP e PS constantes, como mostrado na Tabela 4-6, verifica-se que a difusividade térmica do PS é quase o dobro da do PP, o que fará com que o calor se difunda mais rapidamente através do PS que no PP.

Tabela 4-6 – Comparação de propriedades térmicas entre PS e PP

	Peça PS	Peça PP
Massa volúmica ρ (kg/m ³)	1047	929
Condutibilidade térmica k (W/m°C)	0.145	0.176
Calor específico C_p (kJ/kg°C)	1.170	2.800
Capacidade térmica ρC_p (kJ/m ³ °C)	1225	2601
Difusividade térmica $\alpha=k/(\rho C_p)$ (m ² /s)	12×10^{-8}	6.8×10^{-8}

4.2.3.2 Comparação experimental / simulação

Como no caso da Ficha, foi decidido fazer simulações onde esteja representada uma pequena camada de cola. As simulações foram realizadas com a injeção de PS a 240°C e PP a 230°C, para um tempo de ciclo de 180s. Na Figura 4.66 à Figura 4.71 são comparadas as curvas experimentais com as simulações na proximidade dos alojamentos dos termopares T1, T3 e T4, quer para a injeção de PS como para PP.

Na Tabela 4-7 são comparadas as temperaturas máximas das simulações com as das curvas experimentais. Em todos os termopares o desvio é maior para o PP. No termopar 1, que é onde se atingem as temperaturas mais elevados, temos desvios de 18.54% no caso do PP e 12.12% no caso do PS. Calculando as médias dos desvios para este 3 termopares, temos um valor de 6.82% no caso do PS e 10.75% no caso do PP.

Tabela 4-7 – “Engate” Desvios da temperatura máxima das simulações em relação à curva experimental

		PS	PP
T1	Simul (°C)	51.1	58.3
	Exp (°C)	45.6	49.2
	Desvio %	12.1	18.5
T3	Simul (°C)	39.39	43.2
	Exp (°C)	40.5	41.8
	Desv %	3.1	3.4
T4	Simul (°C)	36.8	39.7
	Exp (°C)	35.0	35.9
	Desv %	5.3	10.4

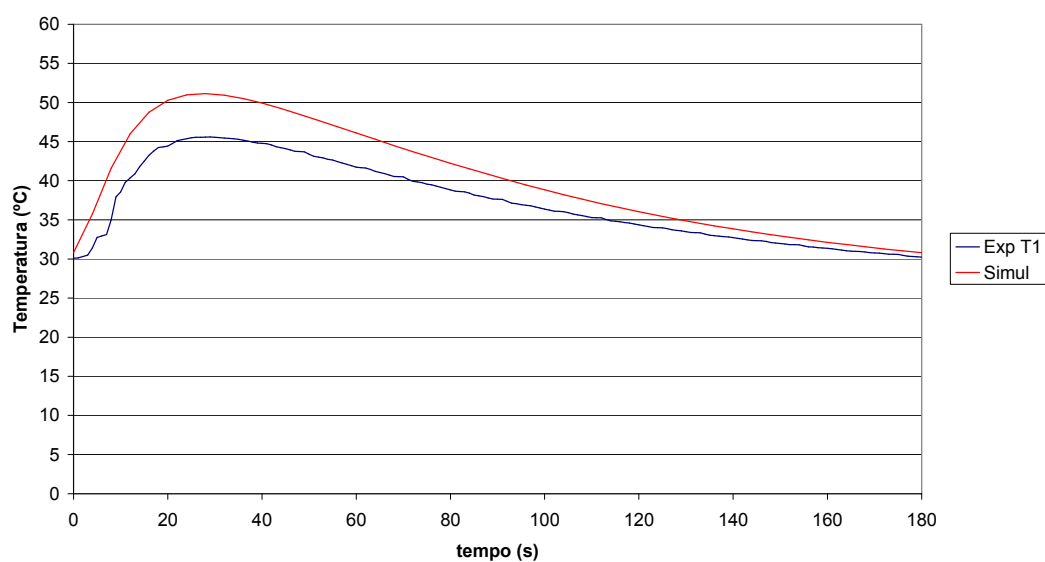


Figura 4.66 – “Engate” PS comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 1

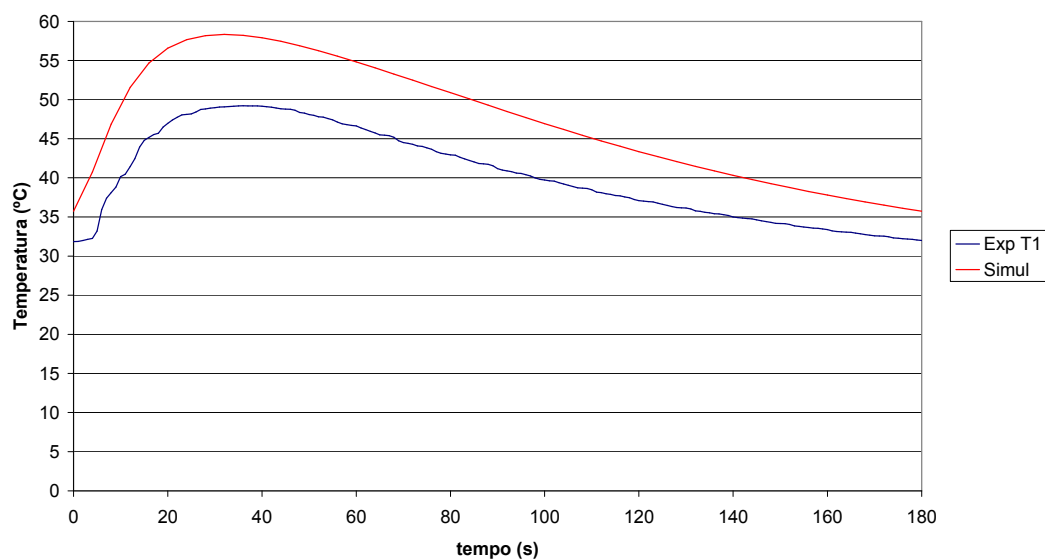


Figura 4.67 – “Engate” PP comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 1

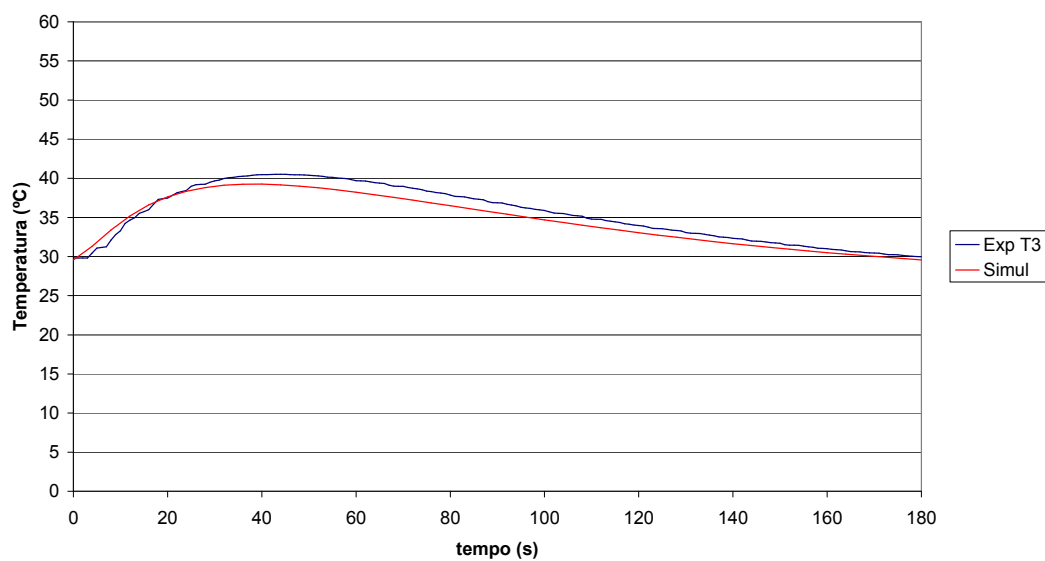


Figura 4.68 – “Engate” PS com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 3

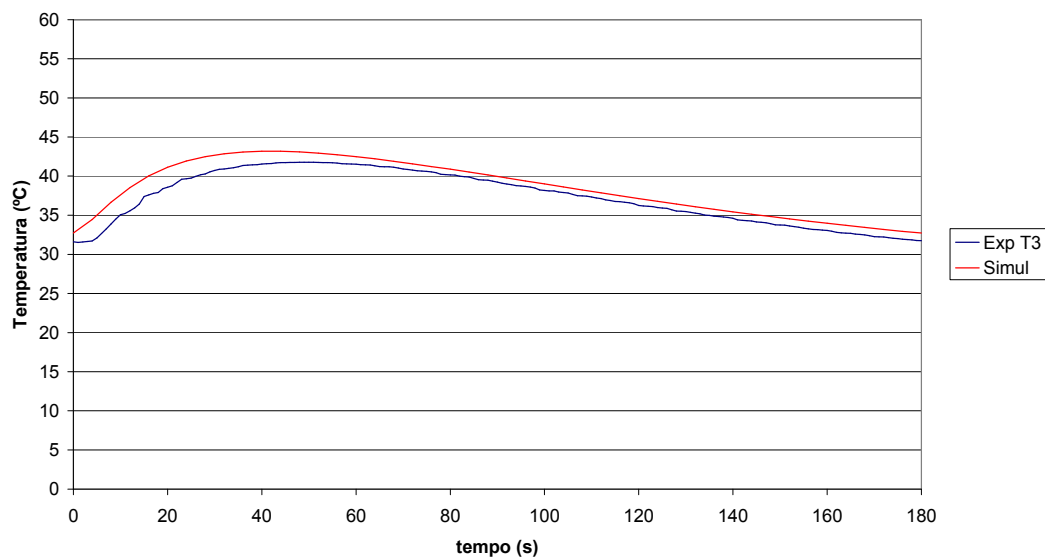


Figura 4.69 – “Engate” PP com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 3

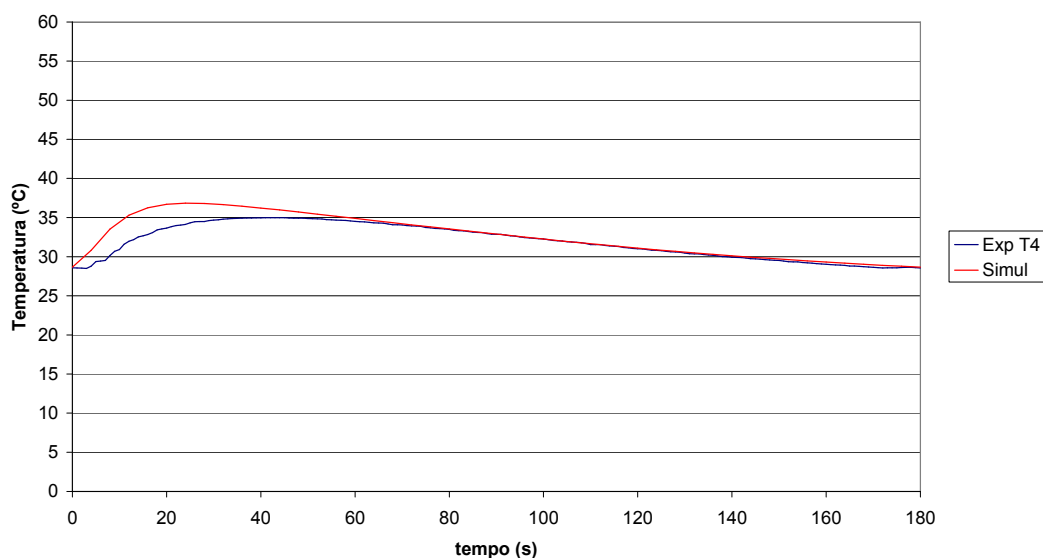


Figura 4.70 – “Engate” PS com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 4

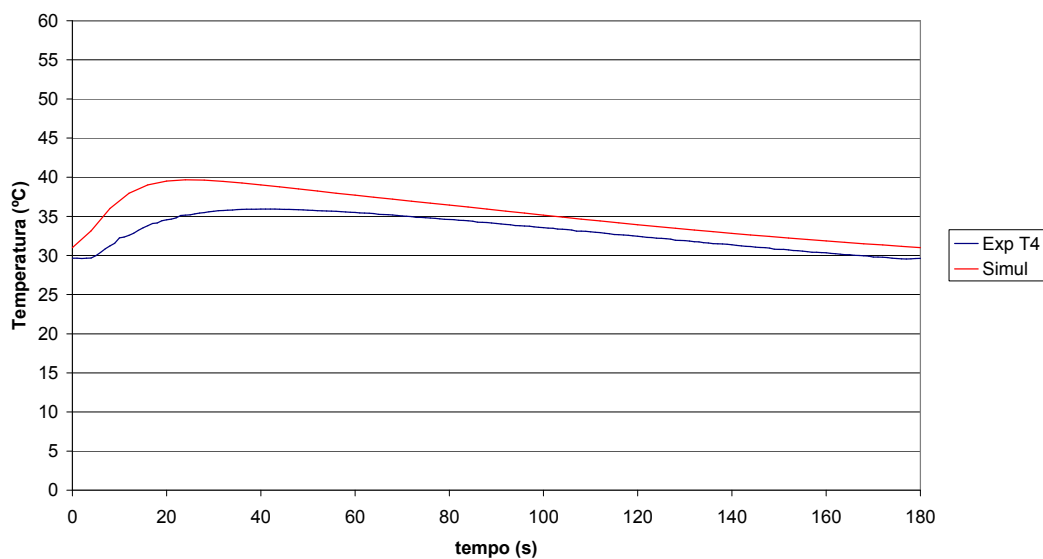
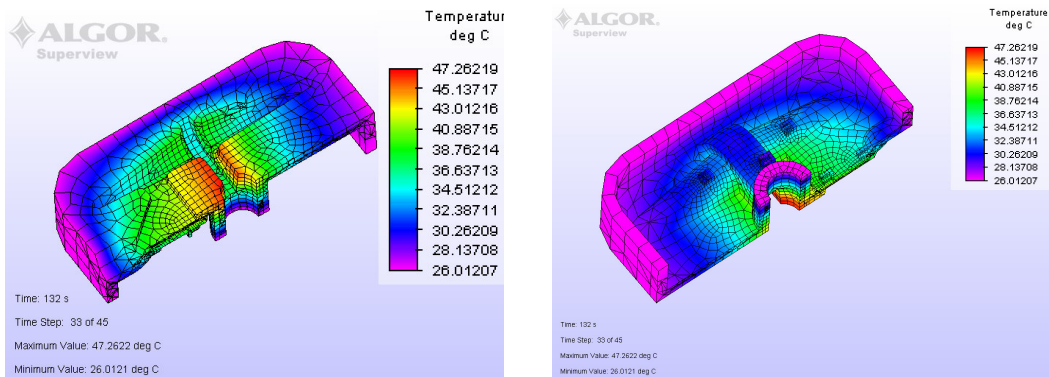


Figura 4.71 – “Engate” PP com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 4

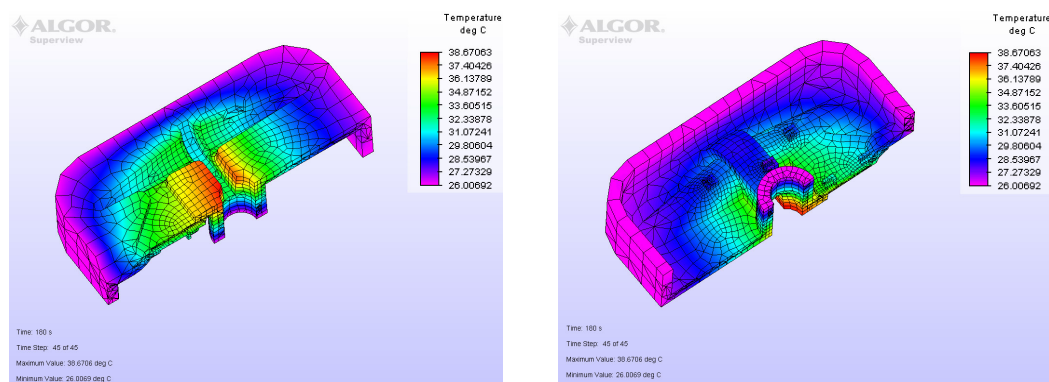
Na Figura 4.72 à Figura 4.75 são mostradas as temperaturas de todo o postigo nos instantes 132 e 180s para o PS e PP. No caso do PS, aos 180s todo o postigo está a temperaturas abaixo dos 38.67°C (Figura 4.73). Já no caso do PP, a temperatura máxima aos 180s é de 52.19°C, embora a maior parte do postigo nas zonas onde o postigo contacta com a moldação seja 39 a 44°C.



a) Frente

b) Traseira

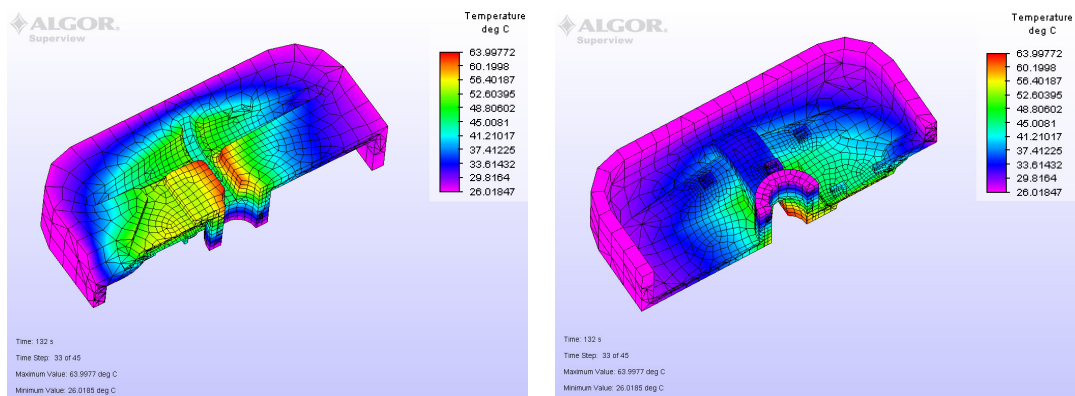
Figura 4.72 – “Engate” PS temperatura aos 132s



a) Frente

b) Traseira

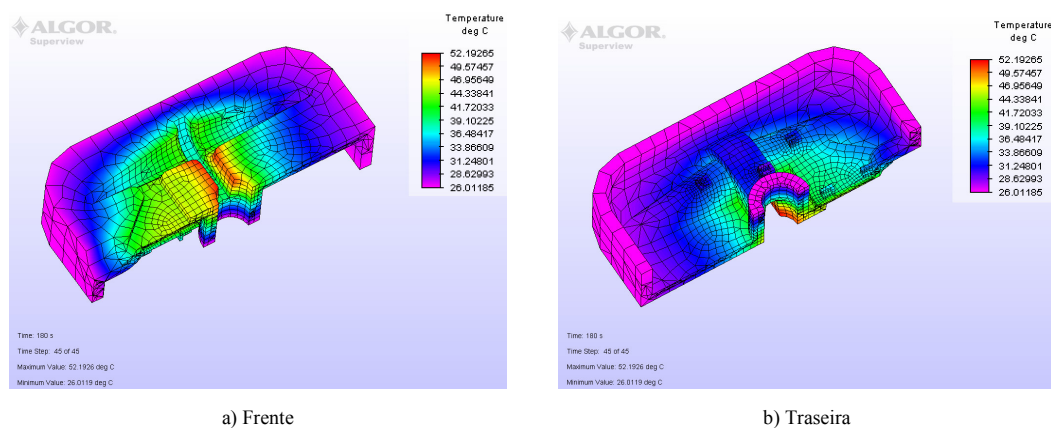
Figura 4.73 – “Engate” PS temperatura aos 180s



a) Frente

b) Traseira

Figura 4.74 – “Engate” PP temperatura aos 132s



a) Frente

b) Traseira

Figura 4.75 – “Engate” PP temperatura aos 180s

Em todos os instantes há uma aresta onde a temperatura está sempre mais elevada para ambos os casos. Esta aresta contacta com a moldação (Figura 4.76 elipse a vermelho), mas a área adjacente não tem contacto com a moldação (Figura 4.76 e Figura 4.77 elipse a preto) e no final do ciclo está a temperaturas elevadas. A má transferência de calor nesta zona é resultado de uma pequena área de contacto com o enchimento. Essa área é pequena devido à casca e às paredes do extractor.

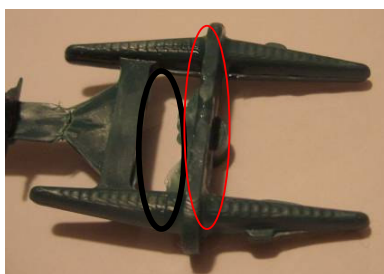


Figura 4.76 - Moldação

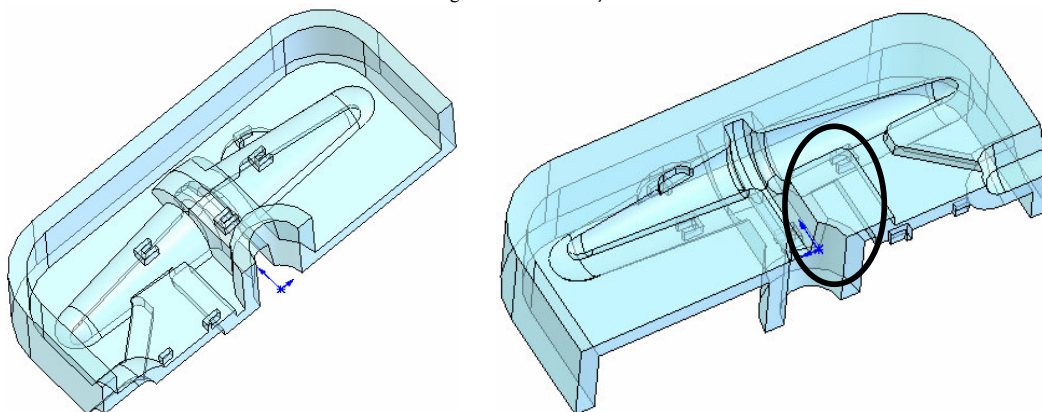


Figura 4.77 – “Engate” corte do postigo SL

Analisando a temperatura ao longo do tempo em 7 pontos na superfície moldante do postigo de estereolitografia, como mostrado na Figura 4.78, vemos que todos os nós estão abaixo dos 40°C no caso do PS e abaixo dos 55°C no caso do PP.

Os nós 3880 e 3915 estão uma superfície que não contacta com a moldação mas que aquece devido à proximidade desta, têm um arrefecimento muito lento. Estes nós mantêm-se a temperaturas mais elevadas que alguns nós que contactam com a moldação (Figura 4.79 e Figura 4.80).

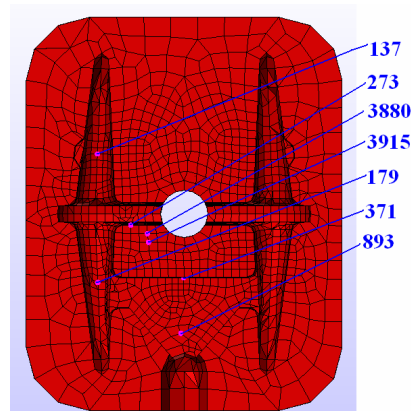


Figura 4.78 – Pontos na superfície da SL

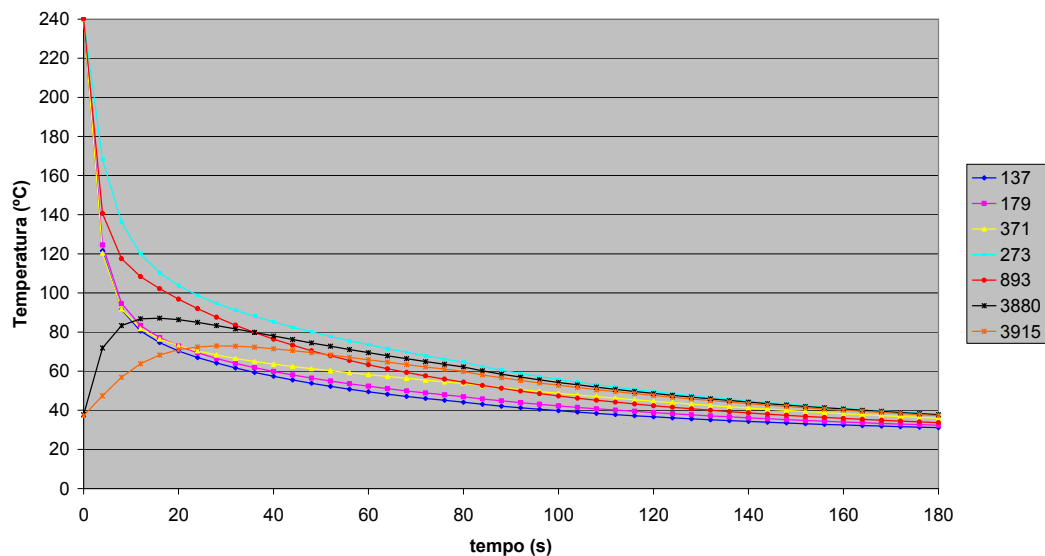


Figura 4.79 – ‘Engate’ PS temperatura dos nós na superfície moldante do SL

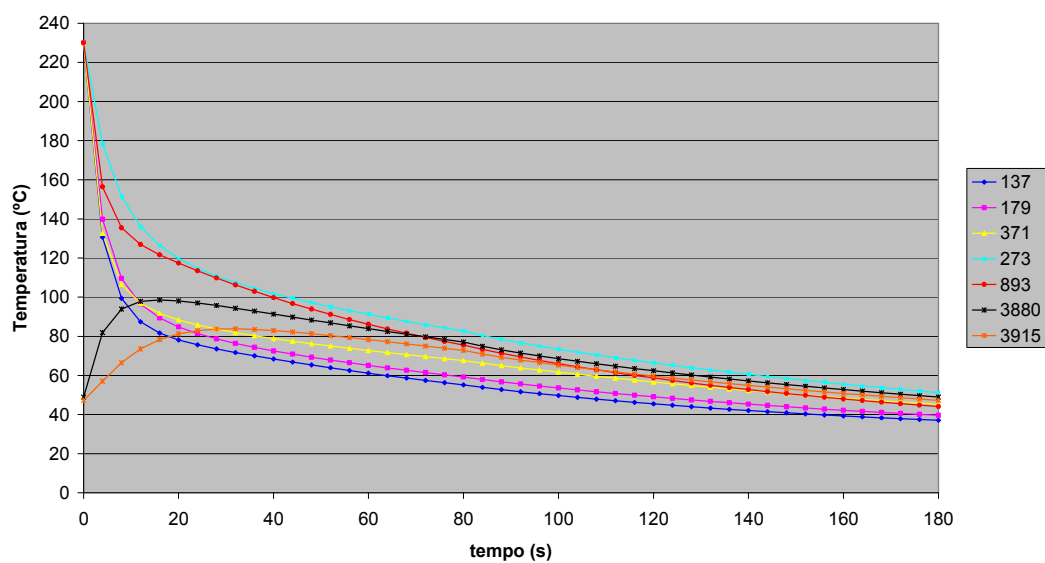


Figura 4.80 – “Engate” PP temperatura dos nós na superfície

5 Conclusão

Neste trabalho foram projectadas e construídas cavidades moldantes produzidas por estereolitografia. Recorreu-se a softwares comerciais para o projecto e previsões do seu desempenho. Para validar os resultados das simulações, as cavidades foram instrumentadas com termopares, de modo a se comparar a evolução da temperatura simulada com a evolução da temperatura obtida experimentalmente.

5.1 Utilização de técnicas computacionais

A utilização dos softwares Moldflow e Algor para a simulação do processo de injeção e do comportamento térmico dos inserts de estereolitografia mostraram ser capazes de gerar informação importante para o projecto.

A simulação do processo de injeção utilizando o Moldflow, permitiu estabelecer os parâmetros iniciais para o arranque do processo de injeção e analisar opções de projecto. No entanto, revelou-se inapropriado para prever o arrefecimento das peças, pois não permite representar uma cavidade moldante em casca produzida por estereolitografia e um enchimento com um material diferente.

A utilização do Algor como software de simulação térmica permite conhecer a evolução da temperatura em cavidades moldantes de estereolitografia e estabelecer o tempo necessário ao seu desempenho adequado. O conhecimento da evolução da temperatura em todo o postigo, permite identificar zonas que tenham mais dificuldade em arrefecer. Podemos numa fase de projecto alterar a geometria do postigo ou da peça, de forma a melhorarmos a extracção de calor nessas áreas.

Os softwares utilizados neste trabalho, não dispõem nas suas bases de dados dos materiais, informação sobre as características dos materiais usados na estereolitografia nem no enchimento. A introdução dos dados dos materiais com base na informação obtida pelos fabricantes permitiu no entanto, obter desvios entre a evolução da temperatura experimental e simulada na ordem dos 6.5% para o PS e 11% para o PP.

5.2 Projecto e construção das cavidades moldantes em estereolitografia

Na estratégia de projecto e fabrico dos inserts deve-se evitar as operações finais tais como: abertura de furos ou roscas, pois pode provocar a fractura do inserto.

Na fase do projecto deve-se considerar os furos para os extractores e furos roscados. É preferível a utilização de inserts metálicos roscados à abertura de rosca no postigo. Devem ser construídos no postigo alojamentos para estes inserts que permitam uma boa colagem.

O ajustamento é particularmente difícil com inserts feitos por estereolitografia. Deve-se evitar ter mais que um postigo de cada lado do molde. Recomenda-se o uso destes postigos em zonas do molde onde não seja necessário o ajustamento.

Os postigos devem ser construídos com um acréscimo na altura de 0.05-0.1mm em relação à caixa do molde, provocando interferência entre os postigos e o molde.

5.3 Utilização e durabilidade dos moldes de estereolitografia

A estereolitografia pode ser utilizada para o fabrico de cavidades e postigos moldantes, mas a sua durabilidade é moderada. Verificou-se neste trabalho que para geometrias relativamente simples a sua durabilidade varia entre algumas dezenas de peças e a centena.

A optimização das condições de processamento são fundamentais para a durabilidade deste tipo de moldes e as condições termomecânicas impostas ao material devem ser minimizadas.

A afinação do processo é fundamental, implicando que durante este processo se inicie com a produção de moldações incompletas a baixa pressão e se aumente a pressão de enchimento progressivamente até ao enchimento da cavidade.

Verificou-se que com o material utilizado na produção das cavidades (Accura SI 40), os ciclos devem ser longos (cerca de 3 minutos), de forma que todo o postigo esteja a uma

temperatura próxima dos 40°C (35°C abaixo da temperatura transição vítrea – T_g) antes do início de um novo ciclo.

6 Sugestões para Trabalhos Futuros

O trabalho realizado nesta dissertação pretende identificar novas direcções de estudo. Essas orientações são aqui registadas como sugestões para futuros trabalhos.

Uma das dificuldades da utilização de programas de elementos finitos é a falta de caracterização das propriedades térmicas dos materiais de estereolitografia e dos enchimentos. Em novos estudos, os materiais utilizados deveriam ser extensivamente caracterizados.

Como a extracção de calor é um dos pontos críticos da utilização desta técnica, devem ser estudados outros materiais, especialmente com melhores propriedades de condutibilidade térmica. Também deveriam ser experimentados outros materiais para o enchimento.

No estudo foram utilizados postigos de estereolitografia com casca com uma espessura mínima de 2mm de espessura. Como a extracção de calor melhora com a diminuição da espessura desta casca, deveria ser definida qual a espessura mínima possível para a casca.

7 Referências

- [1] Cheah, C.M; Chua, C. K.; Ong, H. S. – Rapid Moulding Using Epoxy Tooling Resin, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, nº20 (2002), p.368–374
- [2] Jacobs, P. F. – **Rapid Prototyping and Tooling: Fundamentals of Stereolithography**, McGraw–Hill, New York, 1992. 423p. ISBN: 0-07-032433-6
- [3] Ding, Y.; Lan, H.; Hong, J.; Wu, D. – An integrated manufacturing system for rapid tooling on rapid prototyping, **Robotics and Computer–Integrated Manufacturing**, nº20 (2004) p.281–288
- [4] Vasconcelos, P.; Lino, J.; Neto, R. – **O fabrico rápido de ferramentas ao serviço da engenharia concorrente [em linha] 2004**. [Consult. 10 Mai 2004]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.fe.up.pt>
- [5] Hopkinson, N.; Dickens, P. – **Study of Ejection Forces in the AIM Process**, Leicester University, ISTM99 [em linha], Regular Paper Submission. [Consult. 10 Out. 2004]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.cse.dmu.ac.uk/RMG/people/NeilUniTexas1998.htm>
- [6] DSM-SOMOS – Stereolithography Resins, Product Data Sheet [em linha]. [Consult. 16 Out. 2004]. Disponível em WWW:<URL:http://www.dsm.com/en_US/html/dsms/pd_product_data_sheets.html
- [7] Ludwig, Cardon – **Identification of Rapid Tooling Techniques**, Gent, Hogeschool Gent, 16p.
- [8] M2 Systems, Stereolithography – The Stereolithography Process [em linha]. [Consult. 10 Out. 2004]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.m2-systems.com/prototyping/stereolithography.php>
- [9] Rede Nacional de Prototipagem Rápida – Estereolitografia [em linha]. [Consult. 12 Mai. 2004]. Disponível em WWW:<URL:<http://www2.uninova.pt/rnpr/formation/pt/6/3.1>
- [10] Biancini, F. – Bridging the gap between CAD and CAE using STL files, **International Journal of CAD/CAM**, Vol. 2, nº1 (2002), p. 55–67
- [11] Morva, S. M.; Fadel, G. M. – **Virtual Prototyping Using STL Files**, Design Methodology Group, College of Engineering and Science Clemson University

- [12] Fadel, G. M.; Kirschman, C. – Accuracy issues in CAD to RP translations, **Rapid Prototyping Journal**, Volume 2–Number 2, 1996, p. 4–17
- [13] Pham, D. T.; Dimov, S. S.; Gault, R. S. – Part Orientation in Stereolithography, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, nº15 (1999), p. 674–682
- [14] Wang, W. L.; Cheah, C.M.; Fuh, Y. H.; Lu, L. – Influence of process parameters on stereolithography part shrinkage, **Materials and Design**, Vol. 17 (1996), nº4, p. 205–213
- [15] 3D Systems, Accura SL Materials Datasheet [em linha]. [Consult. 11 Out. 2004]. Disponível em
WWW:<URL:http://www.3dsystems.com/products/solidimaging/accura/datasheets.asp
- [16] Sony Manufacturing Systems Corporation, Stereolithography Systems [em linha]. [Consult. 15 Nov. 2005]. Disponível em
WWW:<URL:http://www.sonysms.co.jp/products/solidcreation/index.html
- [17] Fockeleund & Schwarze, Stereolithography Products [em linha]. [Consult. 15 Nov. 2005]. Disponível em
WWW:<URL:http://www.fockeleundschwarz.de/english/fproductsfs-reb.html
- [18] CMET, Product Information [em linha]. [Consult. 15 Nov. 2005]. Disponível em
WWW:<URL:http://www.cmet.co.jp/E/products/index.html
- [19] Meiko – What is RPS? How does Meiko machine work? [em linha]. [Consult. 15 Nov. 2005]. Disponível em WWW:<URL:http://meiko-rps.mydns.to/meiko-rps/indexe/products/rp/rp.html
- [20] PROFORM, Technologies-Microstereolithography [em linha]. [Consult. 26 Nov. 2005]. Disponível em WWW:<URL:http://www.proform.ch/
- [21] Castle Island's Worldwide Guide to Rapid Prototyping – Light fabricates Little Lady Liberty [em linha]. [Consult. 15 Nov. 2005]. Disponível em
WWW:<URL:http://home.att.net/~egenda/pow/pow19.htm
- [22] Kataria, A.; Rosen, D. W. – Building around inserts: methods for fabricating complex devices in stereolithography, **Rapid Prototyping Journal**, Volume 7–Number 5, 2001, p. 253–261
- [23] Design Prototyping Technologies, Rapid prototyping, Faster and Easier, Threaded Inserts for SLA Parts [e-mail]. [Recebido a 27 Abr. 2006]. Website da empresa <http://dpt-fast.com>

- [24] Holzer, Florian; Fadel, Georges – Design of a 3-degrees of freedom platform for the stereolithography apparatus, **Rapid Prototyping Journal**, Volume 8–Number 2, 2002, p. 100–115
- [25] Maoliang, W.; Wanhua, Z.; Yiping, T.; Dichen, L.; Bingheng, L. – Novel stereolithography technology with conventional UV light, **Rapid Prototyping Journal**, Volume 7–Number 5, 2001, p. 268–274
- [26] Materialise, A mysthic story about Kouros [em linha]. Actualização a 13 Nov. 2005. [Consult. 13 Nov. 2005]. Disponível em
WWW:<URL:http://materialise.com/PressRealises/kouros_ENG.html
- [27] Cheah, C.M.; Fuh, J.Y.H.; Nee A.Y.C.; Lu, L. – Characteristics of fiber-filled photo-polymer used in stereolithography, **Rapid Prototyping Journal**, Volume 5–Number 3, 1999, p. 112–119
- [28] Hinczewski, C.; Corbel, S.; Cartier, T. – Ceramic Suspensions Suitable for Stereolithography, **Journal of the European Ceramic Society**, 18 (1998) p. 583–590
- [29] Saurkar; Sandeep; Malloy; Robert; McCarthy; Stephen – **Rapid Tooling: A study of Different Cooling Techniques for Mold Inserts Used in Direct AIM (Aces Injection Molding) Process**, Institute of Plastic Innovation, University of Massachusetts, Lowell, 4 p.
- [30] Ahrens, C. H.; Ribeiro, A. S.; Beal, V. E. – Heat Flux Canals (HFC) Technique: Na Alternative to Cool Down Stereolithography Moulds, **Journal of Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.**, Vol. XXV, nº3 (Setembro 2003), p.254–258
- [31] Lafratta, F. H. – **Uso de Fluido Refrigerante, Temporariamente Confinado, em Ferramental Rápido para a Injeção de Termoplásticos**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 148p. Tese de Doutorado
- [32] Mishek, Jim – **SLA Uses in Molding for Rapid Prototyping [em linha]**, Vista Technologies LLC, 7 Set. 1997. [Consult. 17 Nov. 2004]. Disponível em
WWW:<URL:http://www.vistatek.com, Novembro 2004
- [33] Palmer, A.; Colton, J. – Design Rules For Stereolithography Injection Molding Inserts, **Journal of Manufacturing Systems**, 30:2 (2000), p. 175–182
- [34] Ribeiro, A. S.; Hopkinson, N.; Ahrens, C. H. – Thermal effects on stereolithography tool during injection moulding, **Rapid Prototyping Journal**, Vol. 10, nº 3 (2004), p. 176–180
- [35] Palmer; Colton – Failure Mechanisms in Stereolithography Injection Molding Tooling, **Journal of Polymer and Science**, June 2000, Vol. 40, nº6, p. 1395–1404

- [36] Cedorge, T.; Colton, J. – Draft Angle and Surface Roughness Effects on Stereolithography Molds, **Polymer Engineering and Science**, Vol. 40, nº7 (July 2000), p. 1581–1588
- [37] Colton, J.; Lebaut, Y. – Thermal Effects on Stereolithography Injection Mold Inserts, **Polymer Engineering And Science**, June 2000, Vol. 40, No. 6
- [38] Ahrens, C.; LAFRATTA, F.; BEAL, V. – **Desenvolvimento e perspectivas do uso de técnicas de rapid tooling por estereolitografia na obtenção de moldados por injeção**, Proceedings of the PLASTSHOW 2002 - Soluções para a indústria de transformação de plástico, Aranda Eventos, São Paulo (SP), 2002
- [39] Holman, J. P. – **Transferência de Calor**, McGraw-Hill, Brasil, 1983, 602p. ISBN: 0-07-450195-X

8 Anexos

Anexo A Materiais

A.1 Propriedades dos Materiais Injectados

Poliestireno Atofina Lacqrene 4241

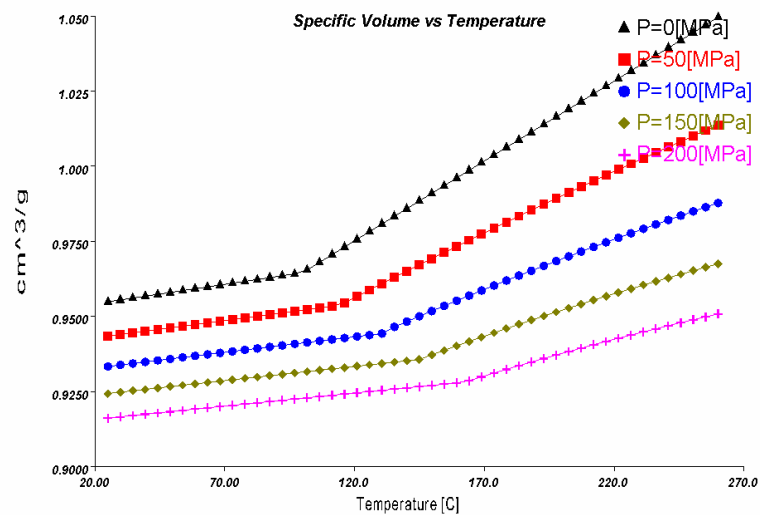


Figura 8.1 – Variação do volume específico com a temperatura

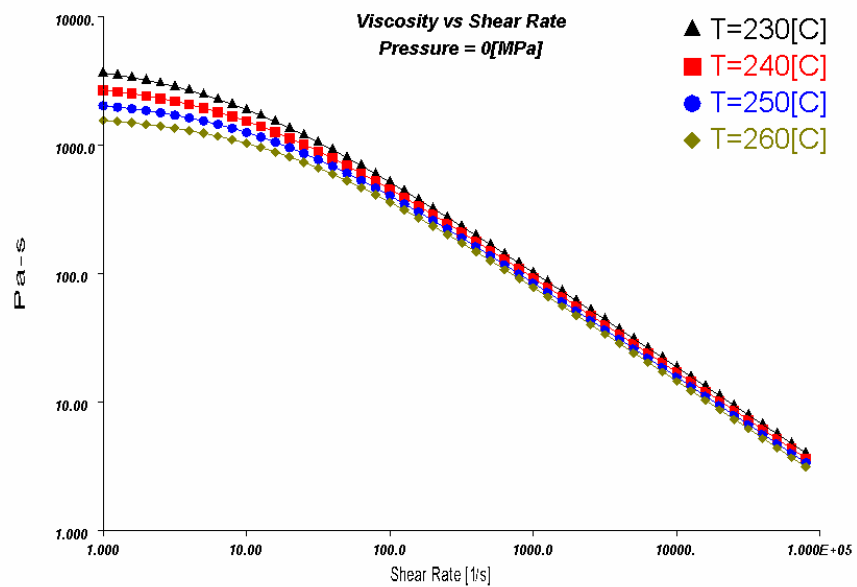


Figura 8.2 – Variação da viscosidade com a taxa de corte

Tabela 8-1 – Propriedades relevantes para PS Lacqrene 4241 (segundo fabricante)

Propriedade	Método	Valor	Unidade
Físicas			
Massa Volúmica	ISO 1183	1.04	g/m ³
Contração		0.4– 0.7	%
Mecânicas			
Módulo de Elasticidade Flexão	ISO 178	2000	MPa
Módulo de Elasticidade Tracção	ISO 178	2100	MPa
Resistência ao impacto Charpy	ISO 179/1eU	10	kJ/m ²
Resistência ao impacto Izod	ISO 180/1A	10	kJ/m ²
Resistência ao limite de deformação	ISO 527–1	26	MPa
Resistência à Rotura	ISO 527–2	24	MPa
Alongamento à Rotura	ISO 527–2	55	%
Dureza Rockwell	ISO 2039–2		R76
Térmicas			
Ponto Vicat 10N (a 50°C)	ISO 306 ^a 50	97	°C
Ponto Vicat 50N (a 50°C)	ISO 306B50	89	°C
HDT	ISO 75–2A	74	°C
Processamento			
Temperatura Injecção		245	°C
Temperatura do Molde		40	°C
Tensão de corte Máxima		0.24	MPa
Taxa de corte Máxima		40000	1/s

Polipropileno Borealis 0D3510

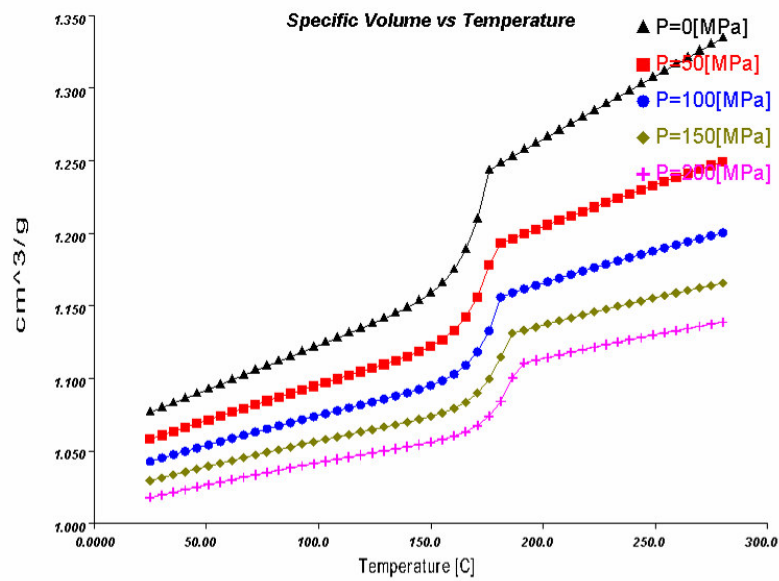


Figura 8.3 – Variação do volume específico com a temperatura

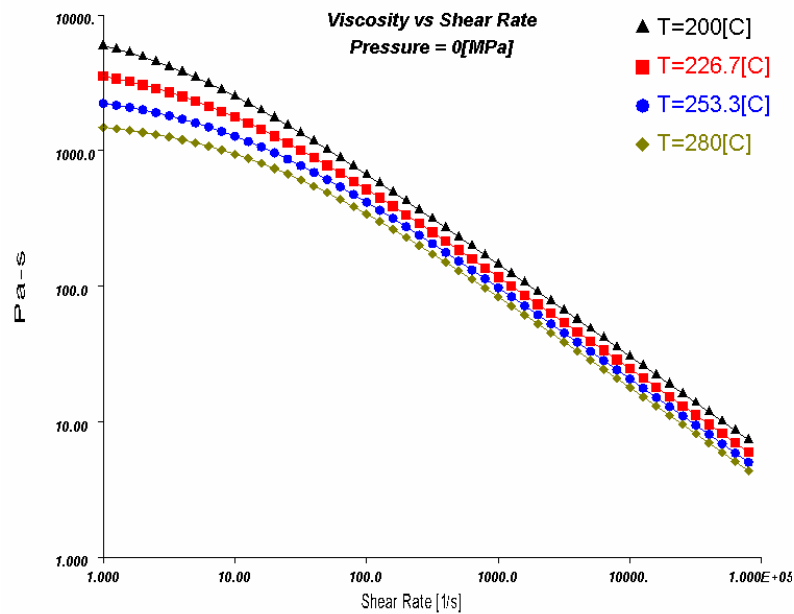


Figura 8.4 – Variação da viscosidade com a taxa de corte

Tabela 8-2 – Propriedades relevantes para PP Borealis 0D3510

Propriedade	Método	Valor	Unidade
Físicas			
Massa Volúmica		0.928	g/m ³
Contração		–	%
Mecânicas			
Módulo de Elasticidade Flexão		1340	MPa
Módulo de Elasticidade Tração		1340	MPa
Resistência ao impacto Charpy			kJ/m ²
Resistência ao impacto Izod			kJ/m ²
Resistência ao limite de deformação			MPa
Resistência à Rotura			MPa
Alongamento à Rotura			%
Dureza Rockwell			R76
Térmicas			
Ponto Vicat 10N (a 50°C)			°C
Ponto Vicat 50N (a 50°C)			°C
HDT			°C
Processamento			
Temperatura Injecção		230	°C
Temperatura do Molde		50	°C
Tensão de corte Máxima		0.26	MPa
Taxa de corte Máxima		24000	1/s

A.2 Propriedades do Material dos Blocos Moldantes de Estereolitografia

Tabela 8-3 – Propriedades relevantes para Accura SI40 (segundo fabricante)

Propriedade	Método	Valor	Unidade
Massa Volúmica (a 25°C)		1.1	g/cm ³
Viscosidade (a 30°C)		485	cps
Profundidade Penetração Dp		6.6	mils
Exposição Crítica Ec		21.7	mJ/cm ²
Tensão Cedência	ASTM D638	73.9–74.2	MPa
Alongamento na Rotura	ASTM D638	4.8–5.1	%
Módulo Elasticidade	ASTM D638	2906–3321	MPa
Tensão Rotura	ASTM D790	116.2–118.3	MPa
Módulo Flexão	ASTM D790	3113–3182	MPa
Resistência ao impacto Izod	ASTM D256	22.5–30.9	J/m
Temperatura de Amolecimento (a 66 PSI)	ASTM D648	101	°C
Temperatura de Amolecimento (a 246 PSI)	ASTM D648	82	°C
Temperatura de transição Vítrea Tg	DMA, E	74.9	°C
Coefficiente de Dilatação Linear			
TMA (T<Tg)	ASTM E 831–93	60.8	10 ⁻⁶ m/m°C
TMA (T>Tg)	ASTM E 831–93	167	10 ⁻⁶ m/m°C
Dureza, Shore D	ASTM D2240	84	

Tabela 8-4 – Propriedades da resina utilizadas pelo MPI

Propriedade	Valor	Unidade
Massa Volúmica	1.25	g/cm ³
Calor Específico	1047	J/kg °C
Condutibilidade Térmica	0.2	W/m°C
Módulo Elasticidade	2600	MPa
Coefficiente Poisson	0.35	
Coefficiente Dilatação Linear	5.9	10 ⁻⁵ (1/°C)

Anexo B Injecção

B.1 Máquinas de Injecção



Figura 8.5 – Injectora ENGEL ES200/45 HL-V

Tabela 8-5 – Características da Injectora ENGEL ES200/45 HL-V

Sistema	Característica	Valor	Unidade
Injecção	Diâmetro do Fuso	30	mm
	Relação L/D	20.5	–
	Volume Injecção	135	cm ³
	Curso Injecção	200	mm
	Caudal de Injecção	24	g/s
	Rotação do fuso	20–480	rpm
Fecho	Força de Fecho Máxima	45	ton
	Curso Máximo de Abertura	350	mm
	Altura Mínima de molde	180	mm
	Altura Máxima de molde	–	mm
	Distância entre chapas	530	mm
	Área útil	550X330	mmxmm
Extracção	Força Máxima Extracção	4	ton
	Curso Máximo Extracção	100	mm
Montagem Molde	Anel de centragem	100	mm



Figura 8.6 – Injectora KLOCKNER FERROMATIC FM20

Tabela 8-6 – Características da KLOCKNER FERROMATIC FM20

Sistema	Característica	Valor	Unidade
Injecção	Diâmetro do Fuso	25	mm
	Relação L/D		–
	Volume Injecção	37	g
	Curso Injecção		mm
	Caudal de Injecção		g/s
	Rotação do fuso		rpm
Fecho	Força de Fecho Máxima	20	ton
	Curso Máximo de Abertura	280	mm
	Altura Mínima de molde		mm
	Altura Máxima de molde		mm
	Distância entre chapas		mm
	Área útil	240x260	mmxmm
Extracção	Força Máxima Extracção		ton
	Curso Máximo Extracção		mm
Montagem Molde	Anel de centragem	110	mm

B.2 Condições de processamento

B.2.1 Placa

Tabela 8-7 – Condições de processamento para “placa”

	Valor	Unidades
Condições de processamento		
Temperatura de injeção	230	°C
Temperatura do molde (refrigeração)	25	°C
Volume de injeção		
Curso do fuso	25	mm
Velocidade de rotação do fuso	200	rpm
Força de fecho	200	kN
Injeção		
Pressão de injeção máxima	30	bar
Velocidade	26	mm/s
Curso de injeção	25	mm
Curso da almofada	–	–
Comutação para a 2ª pressão	12	mm
Tempo de injeção máximo	2.5	s
Compactação		
Pressão	7	bar
tempo de compactação	5	s
Arrefecimento		
tempo de arrefecimento	35	s
tempo total de ciclo	–	s

B.2.2 Ficha

Tabela 8-8 – Condições de processamento para “Ficha eléctrica”

Tabela 3.3 – Condições de processamento para a Plena eléctrica						
	Valor					Unidades
Condições de processamento						
Temperatura de injecção	240					°C
Temperatura do molde (refrigeração)	25					°C
Volume de injecção						
Curso do fuso	20					mm
Velocidade de rotação do fuso	100					rpm
Força de fecho	250					kN
Injecção						
Pressão de injecção máxima	180					bar
Velocidade	11					mm/s
Curso de injecção	20					mm
Curso da almofada	–					–
Comutação para a 2ª pressão	11					mm
Tempo de injecção máximo	3 / 1.7 real					s
Compactação						
Pressão	7					bar
tempo de compactação	10					s
Arrefecimento						
tempo de arrefecimento	80	100	110	160	190	s
tempo total de ciclo	100	120	130	180	210	s

B.2.3 Engate plástico

Tabela 8-9 – Condições de processamento para “Engate plástico”

	Valor			Unidades
Condições de processamento				
Temperatura de injecc�o	230/240			�C
Temperatura do molde (refrigera�o)	25			�C
Volume de injecc�o	10			cm ³
Curso do fuso	20			mm
Velocidade de rota�o do fuso	100			rpm
For�a de fecho	250			kN
Injec�o				
Press�o de injecc�o m�xima	180			bar
Velocidade	10			mm/s
Curso de injecc�o	20			mm
Curso da almofada	–			–
Comuta�o para a 2 ^a press�o	12.6			mm
Tempo de injecc�o m�ximo	2.5/ 1.22 real			s
Compacta�o				
Press�o	8			bar
tempo de compacta�o	20			s
Arrefecimento				
tempo de arrefecimento	104	154	204	s
tempo total de ciclo	130	180	230	s

Anexo C Simulações em Algor

Tabela 8-10 – Propriedades da água a 80 °F (26.67 °C) [39] para ALGOR

Propriedades da água a 80 °F (26.67 °C) [39]	
Massa volúmica ρ	995.8 kg/m ³
Viscosidade dinâmica μ	9.8x10 ⁻⁴ kg/ms
Calor específico Cp	4.179 kJ/kg°C
Condutibilidade térmica k	0.614 W/m°C

Tabela 8-11 – Propriedades dos materiais para simulação em ALGOR

	Resina SL	Peça PS	Peça PP	Enchimento	Alumínio
Massa volúmica ρ (kg/m ³)	1100	1047	0929	1100	2700
Condutibilidade térmica k (W/m°C)	0.18	0.145	0.176	0.5	167
Calor específico Cp (kJ/kg°C)	1.047	1.170	2.800	1.047	0.896

Anexo D Simulações de Fluxo em Moldflow (MPI)

D.1 Parâmetros de processo para simulação

D.1.1 Placa

Tabela 8-12 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow inicial

Opção	
Fase de arrefecimento	
Temperatura do molde	40°C
Temperatura do fundido	240°C
Fase de Enchimento	
Controlo de enchimento	Automático
Método de Comutação para a 2ª pressão	Automático
Tipo de controlo da fase compactação	% da pressão de enchimento versus tempo
Perfil da fase de compactação	Duração 5s, valor 80% da pressão máxima de injeção
Opções avançadas	
Material a injectar	PS Lacqrene 4241
Controlo de processo	Controlador de processos pré definido
Máquina de injeção	ENGEL ES200/45 HL-V (ver Tabela 8-5)
Material do molde	Resina (ver Tabela 8-4)
Algoritmo de cálculo	Algoritmo de moldação por injeção de termoplásticos

Tabela 8-13 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow – Cool – Flow

Opção	
Fase de arrefecimento	
Temperatura do molde	40°C
Temperatura do fundido	240°C
Tempo para enchimento e arrefecimento	76s
Tempo de molde aberto	98s
Tolerância de convergência de temperatura de molde	0.1
Número máximo de iterações para temperatura do molde	50
Método de computação de influência geométrica	Automático
Fase de Enchimento	
Controlo de enchimento	Injection Time 1s
Método de Comutação para a 2ª pressão	Automático
Tipo de controlo da fase compactação	% da pressão de enchimento versus tempo
Perfil da fase de compactação	Duração 5s, valor 80% da pressão máxima de injeção
Opções avançadas	
Material a injectar	PS Lacqrene 4241
Controlo de processo	Controlador de processos pré definido
Máquina de injeção	ENGEL ES200/45 HL-V (ver Tabela 8-5)
Material do molde	Resina (ver Tabela 8-4)
Algoritmo de cálculo	Algoritmo de moldação por injeção de termoplásticos

D.1.2 Ficha

Tabela 8-14 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow inicial

Opção	
Fase de arrefecimento	
Temperatura do molde	40°C
Temperatura do fundido	240°C
Fase de Enchimento	
Controlo de enchimento	Injection Time 1s
Método de Comutação para a 2ª pressão	Automático
Tipo de controlo da fase compactação	% da pressão de enchimento versus tempo
Perfil da fase de compactação	Duração 5s, valor 80% da pressão máxima de injeção
Opções avançadas	
Material a injectar	PS Lacqrene 4241
Controlo de processo	Controlador de processos pré definido
Máquina de injeção	ENGEL ES200/45 HL-V (ver Tabela 8-5)
Material do molde	Resina (ver Tabela 8-4)
Algoritmo de cálculo	Algoritmo de moldação por injeção de termoplásticos

Tabela 8-15 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow – Cool – Flow

Opção	
Fase de arrefecimento	
Temperatura do molde	40°C
Temperatura do fundido	240°C
Tempo de injeção	Automático
Tempo para enchimento e arrefecimento	Automático
Tempo de molde aberto	100s
Tolerância de convergência de temperatura de molde	0.1
Número máximo de iterações para temperatura do molde	50
Método de computação de influência geométrica	Automático
Fase de Enchimento	
Controlo de enchimento	Automático
Método de Comutação para a 2ª pressão	Automático
Tipo de controlo da fase compactação	% da pressão de enchimento versus tempo
Perfil da fase de compactação	Duração 5s, valor 80% da pressão máxima de injeção
Opções avançadas	
Material a injectar	PS Lacqrene 4241
Controlo de processo	Controlador de processos pré definido
Máquina de injeção	ENGEL ES200/45 HL-V (ver Tabela 8-5)
Material do molde	Resina (ver Tabela 8-4)
Algoritmo de cálculo	Algoritmo de moldação por injeção de termoplásticos

D.1.3 Engate

Tabela 8-16 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow inicial

Opção	
Fase de arrefecimento	
Temperatura do molde	40°C
Temperatura do fundido	240°C
Fase de Enchimento	
Controlo de enchimento	Injection Time 1s
Método de Comutação para a 2ª pressão	99% do volume
Tipo de controlo da fase compactação	% da pressão de enchimento versus tempo
Perfil da fase de compactação	Duração 5s, valor 80% da pressão máxima de injeção
Opções avançadas	
Material a injectar	PS Lacqrene 4241
Controlo de processo	Controlador de processos pré definido
Máquina de injeção	ENGEL ES200/45 HL-V (ver Tabela 8-5)
Material do molde	Resina (ver Tabela 8-4)
Algoritmo de cálculo	Algoritmo de moldação por injeção de termoplásticos

Tabela 8-17 – Parâmetros de processo para simulação de tipo Flow – Cool – Flow

Opção	
Fase de arrefecimento	
Temperatura do molde	40°C
Temperatura do fundido	240°C
Tempo de injeção	Automático
Tempo para enchimento e arrefecimento	76s
Tempo de molde aberto	98s
Tolerância de convergência de temperatura de molde	0.1
Número máximo de iterações para temperatura do molde	50
Método de computação de influência geométrica	Automático
Fase de Enchimento	
Controlo de enchimento	Automático
Método de Comutação para a 2ª pressão	Automático
Tipo de controlo da fase compactação	% da pressão de enchimento versus tempo
Perfil da fase de compactação	Duração 5s, valor 80% da pressão máxima de injeção
Opções avançadas	
Material a injectar	PS Lacqrene 4241
Controlo de processo	Controlador de processos pré definido
Máquina de injeção	ENGEL ES200/45 HL-V (ver Tabela 8-5)
Material do molde	Resina (ver Tabela 8-4)
Algoritmo de cálculo	Algoritmo de moldação por injeção de termoplásticos

D.2 Estatística da Malha

D.2.1 “Placa Rectangular”

Tabela 8-18 – Relatório da estatística Malha (inicial só meia peça) com tamanho da aresta 2mm e tolerância 0.01

Entity counts	
Surface triangles	1590
Nodes	811
Beams	0
Connectivity regions	1
Edge details	
Free edges	38
Manifold edges	2366
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.199197
Maximum aspect ratio	5.044370
Average aspect ratio	1.939050
Match ratio	
Match ratio	93.7%

Tabela 8-19 – Estatística da Malha (inicial só peça) com tamanho da aresta 2mm e tolerância 0.01

Entity counts	
Surface triangles	2870
Nodes	1437
Beams	0
Connectivity regions	1
Edge details	
Free edges	0
Manifold edges	4305
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.199197
Maximum aspect ratio	3.863715
Average aspect ratio	1.930118
Match ratio	
Match ratio	93.2%

Tabela 8-20 – Estatística da Malha (final com refrigeração e molde)

Entity counts	
Surface triangles	3474
Nodes	1793
Beams	50
Connectivity regions	4
Edge details	
Free edges	0
Manifold edges	5211
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.199197
Maximum aspect ratio	3.863715
Average aspect ratio	1.942504
Match ratio	
Match ratio	94.4%

D.2.2 “Ficha Eléctrica”

Tabela 8-21 – Relatório da estatística da malha ficha eléctrica antes da correcção

Entity counts	
Surface triangles	1670
Nodes	837
Beams	0
Connectivity regions	1
Edge details	
Free edges	0
Manifold edges	2505
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.154779
Maximum aspect ratio	13.806108
Average aspect ratio	1.973578
Match ratio	
Match ratio	76.2%

Tabela 8-22 – Estatística da malha (inicial só peça) tamanho da aresta 2mm e tolerância 0.01

Entity counts	
Surface triangles	1666
Nodes	835
Beams	0
Connectivity regions	1
Edge details	
Free edges	0
Manifold edges	2499
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.154779
Maximum aspect ratio	5.381930
Average aspect ratio	1.934126
Match ratio	
Match ratio	76.1%

Tabela 8-23 – Estatística da Malha (final com refrigeração e molde)

Entity counts	
Surface triangles	2182
Nodes	1147
Beams	50
Connectivity regions	4
Edge details	
Free edges	0
Manifold edges	3273
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.154779
Maximum aspect ratio	5.381930
Average aspect ratio	1.950031
Match ratio	
Match ratio	84.4%

D.2.3 “Engate plástico macho”

Tabela 8-24 – relatório da estatística da malha engate plástico macho antes da correcção

Entity counts	
Surface triangles	2152
Nodes	1088
Beams	0
Connectivity regions	1
Edge details	
Free edges	48
Manifold edges	3204
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	40
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.154779
Maximum aspect ratio	27.401750
Average aspect ratio	2.156837
Match ratio	
Match ratio	79.3%

Tabela 8-25 – Estatística da Malha (inicial só peça) tamanho da aresta 2mm e tolerância 0.01

Entity counts	
Surface triangles	2112
Nodes	1056
Beams	0
Connectivity regions	1
Edge details	
Free edges	0
Manifold edges	3168
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.154779
Maximum aspect ratio	4.978145
Average aspect ratio	1.942088
Match ratio	
Match ratio	79.6%

Tabela 8-26 – Estatística da Malha (final com refrigeração e molde)

Entity counts	
Surface triangles	2948
Nodes	1538
Beams	60
Connectivity regions	4
Edge details	
Free edges	0
Manifold edges	4422
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Elements not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.154779
Maximum aspect ratio	4.978145
Average aspect ratio	1.958963
Match ratio	
Match ratio	70.4%

Anexo E Desempenho térmico

E.1 Peça “Ficha Eléctrica”

Registo em PicoLog for Window Realeased 5.13.3

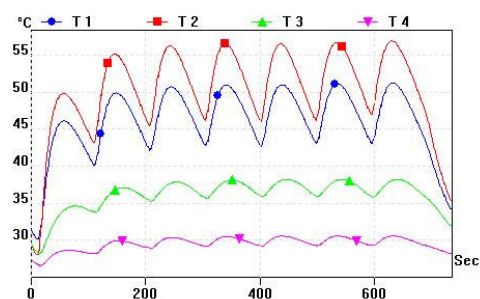


Figura 8.7 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 100s

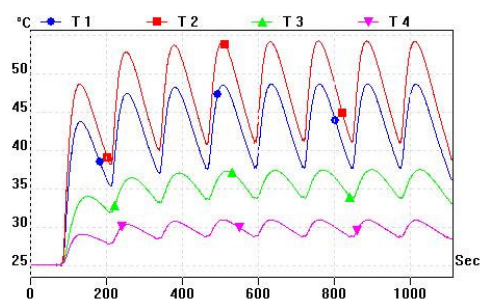


Figura 8.8 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 120s

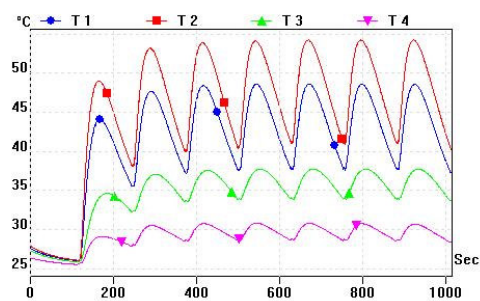


Figura 8.9 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 130s

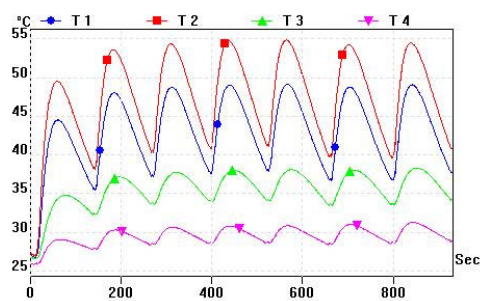


Figura 8.10 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 135s

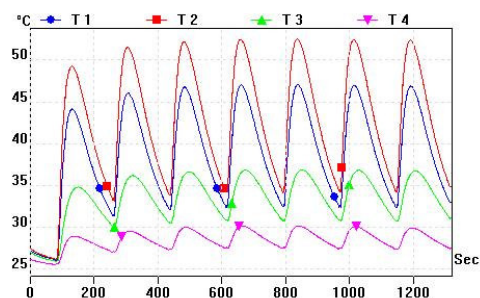


Figura 8.11 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 180s

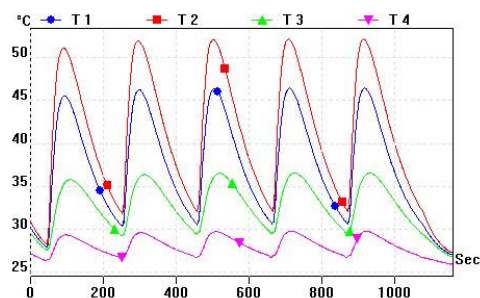


Figura 8.12 – Temperaturas “ficha” para um tempo de ciclo de 210s

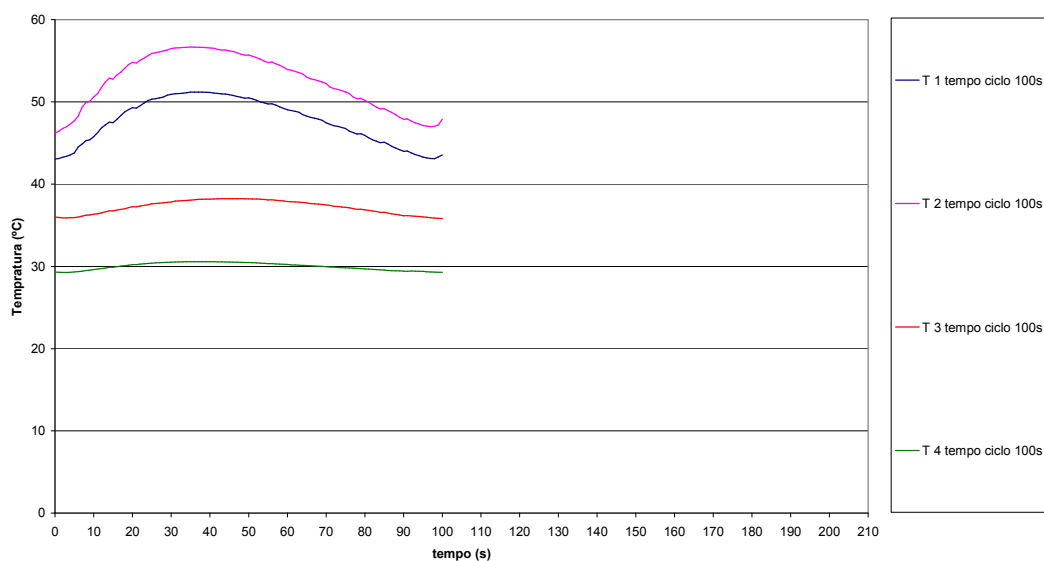


Figura 8.13 – “Ficha” tempo de ciclo 100s

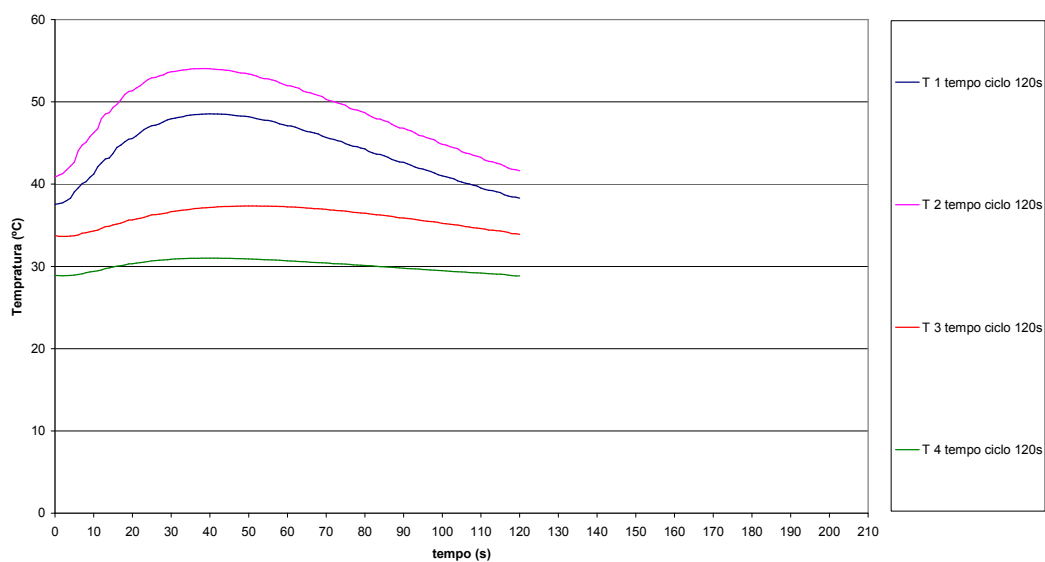


Figura 8.14 – “Ficha” tempo de ciclo 120s

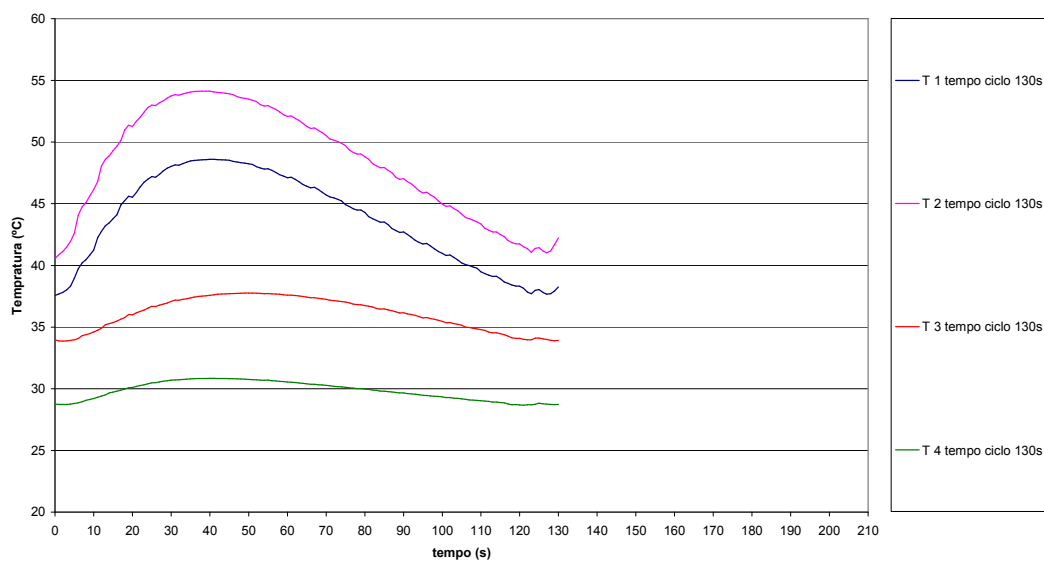


Figura 8.15 – “Ficha” tempo de ciclo 130s

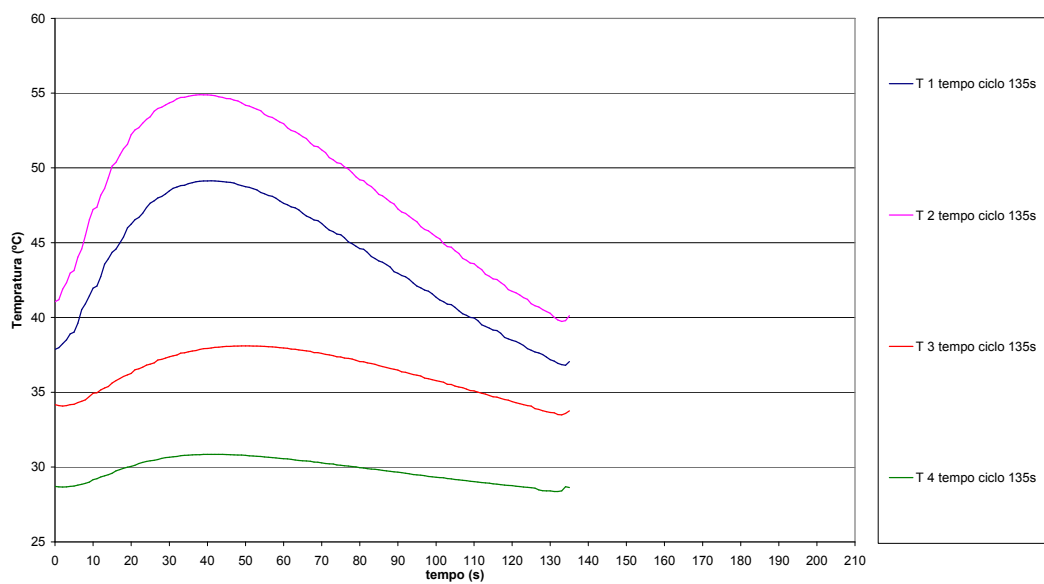


Figura 8.16 – “Ficha” tempo de ciclo 135s

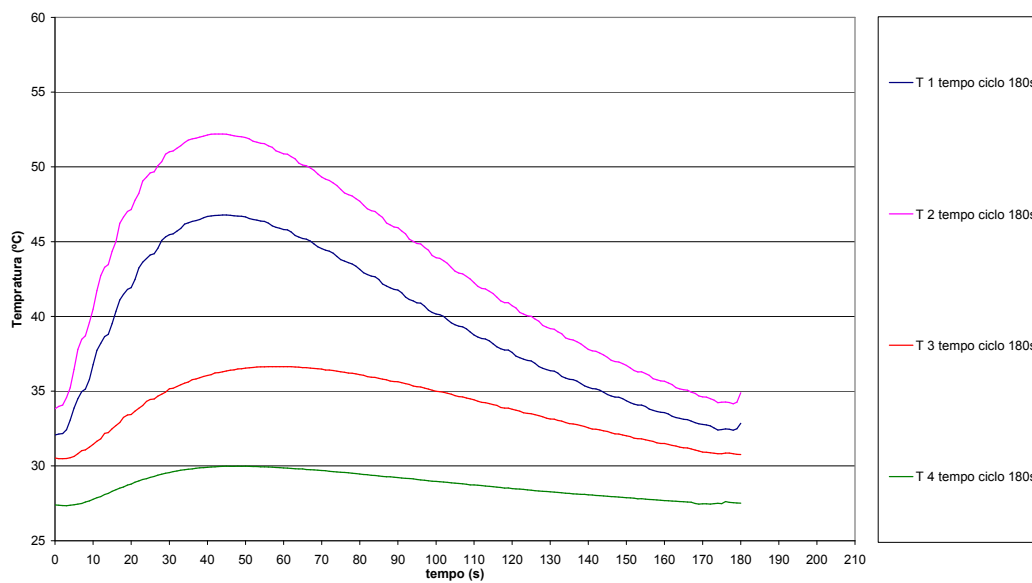


Figura 8.17 – “Ficha” tempo de ciclo 180s

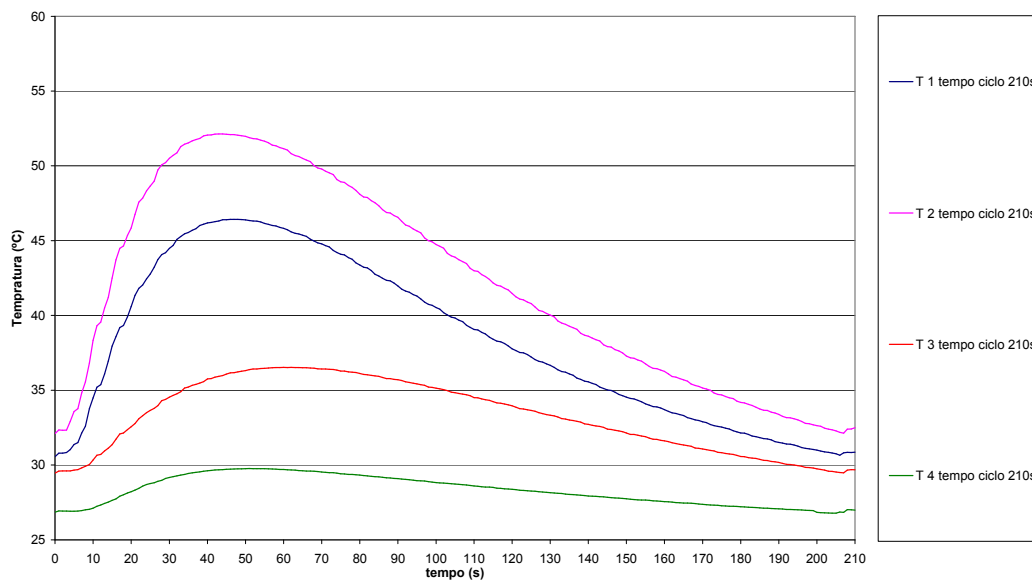


Figura 8.18 – “Ficha” tempo de ciclo 210s

E.2 Peça “Engate plástico macho”

Registo em PicoLog for Window Realesed 5.13.3

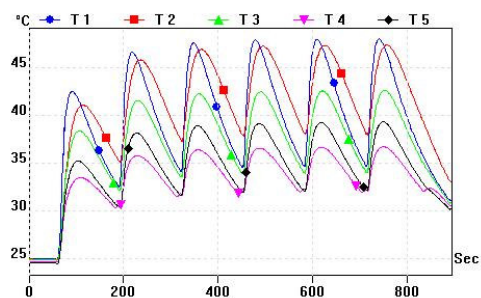


Figura 8.19 – Injecção de PS com um tempo de ciclo 130s

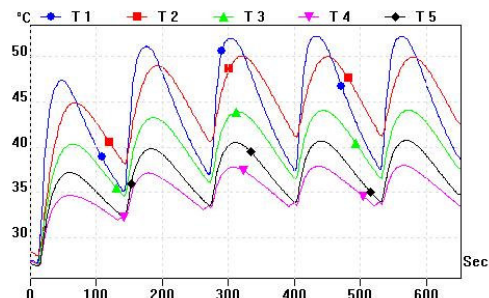


Figura 8.20 – Injecção de PP com um tempo de ciclo 130s

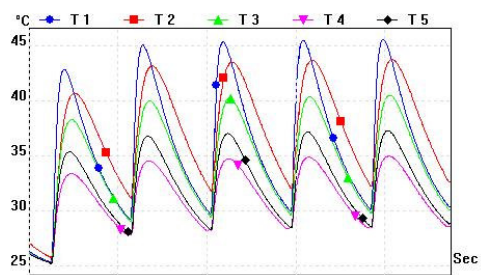


Figura 8.21 – Injecção de PS com um tempo de ciclo 180s

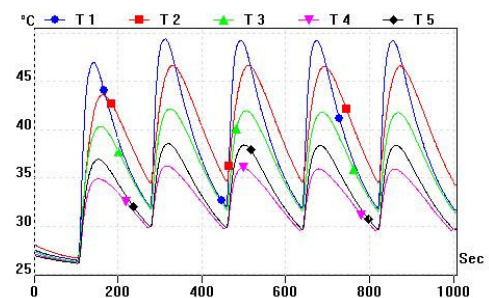


Figura 8.22 – Injecção de PP com um tempo de ciclo 180s

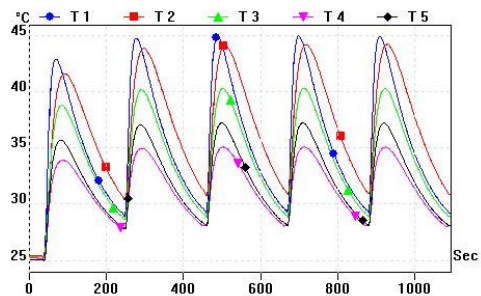


Figura 8.23 – Injecção de PS com um tempo de ciclo 210s

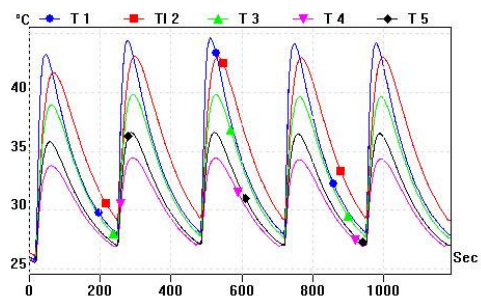


Figura 8.24 – Injecção de PS com um tempo de ciclo 230s

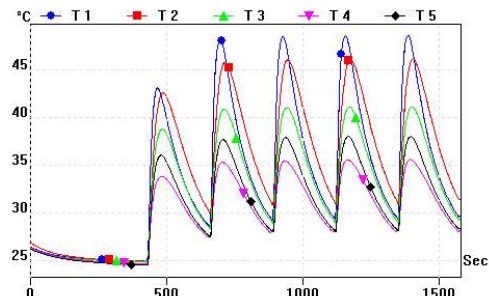


Figura 8.25 – Injecção de PP com um tempo de ciclo 230s

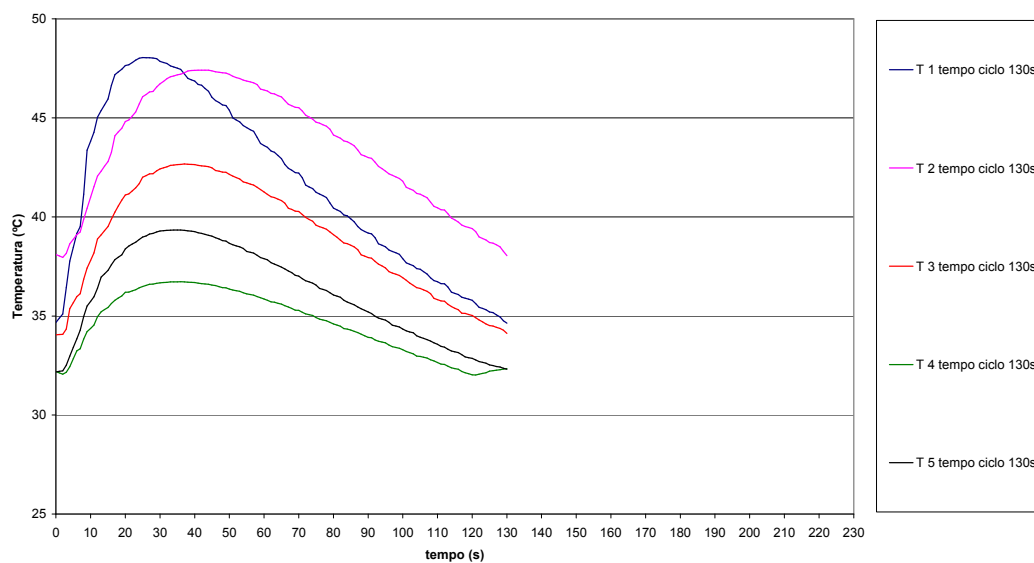


Figura 8.26 – “Engate” PS tempo de ciclo 130s

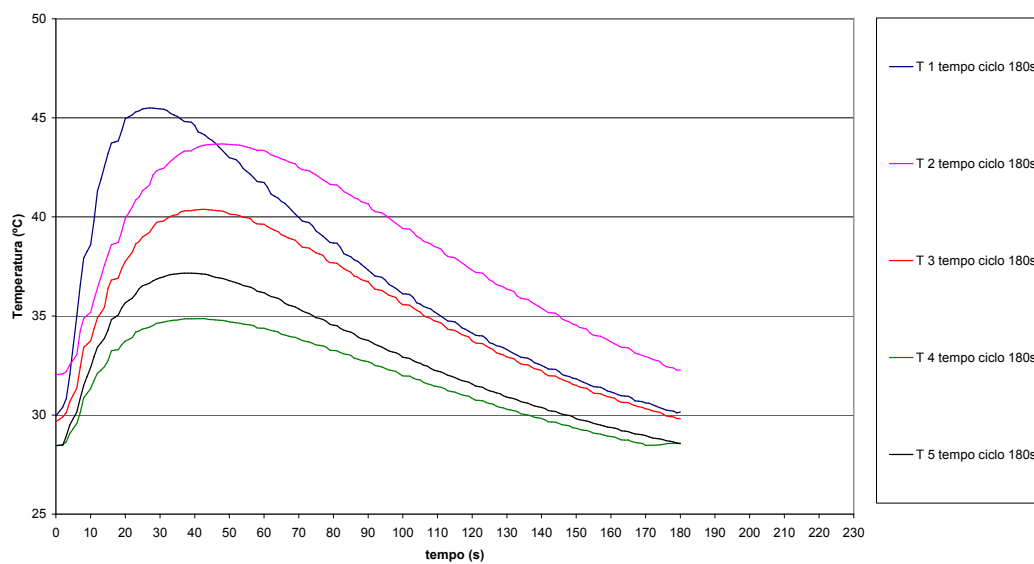


Figura 8.27 – “Engate” PS tempo de ciclo 180s

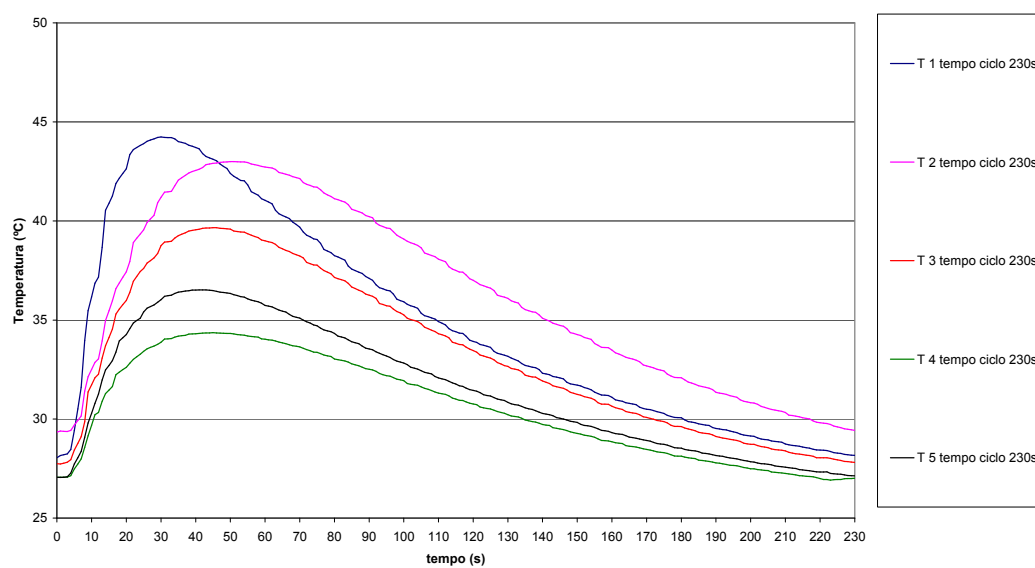


Figura 8.28 – “Engate” PS tempo de ciclo 230s

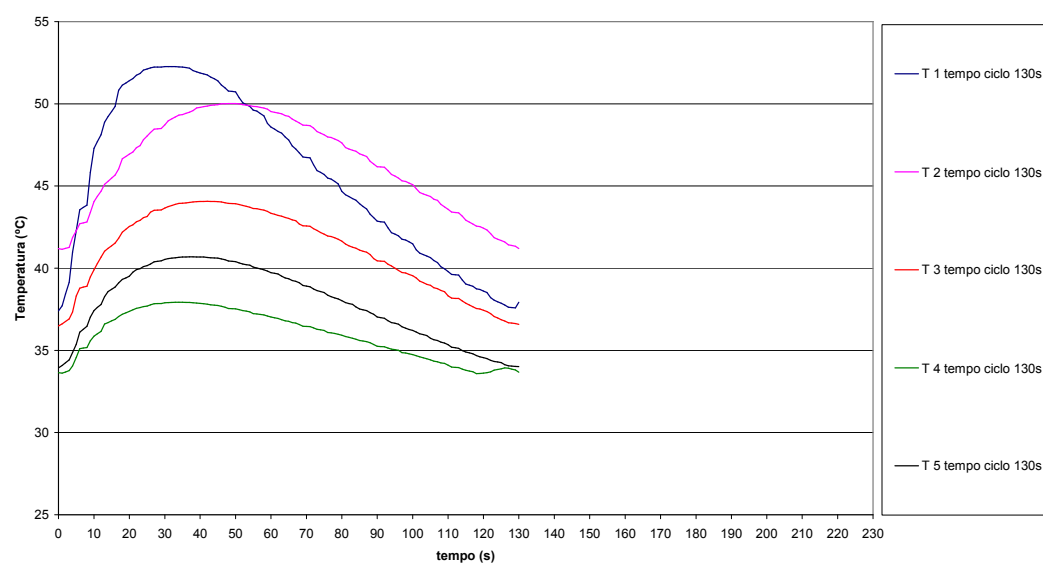


Figura 8.29 – “Engate” PP tempo de ciclo 130s

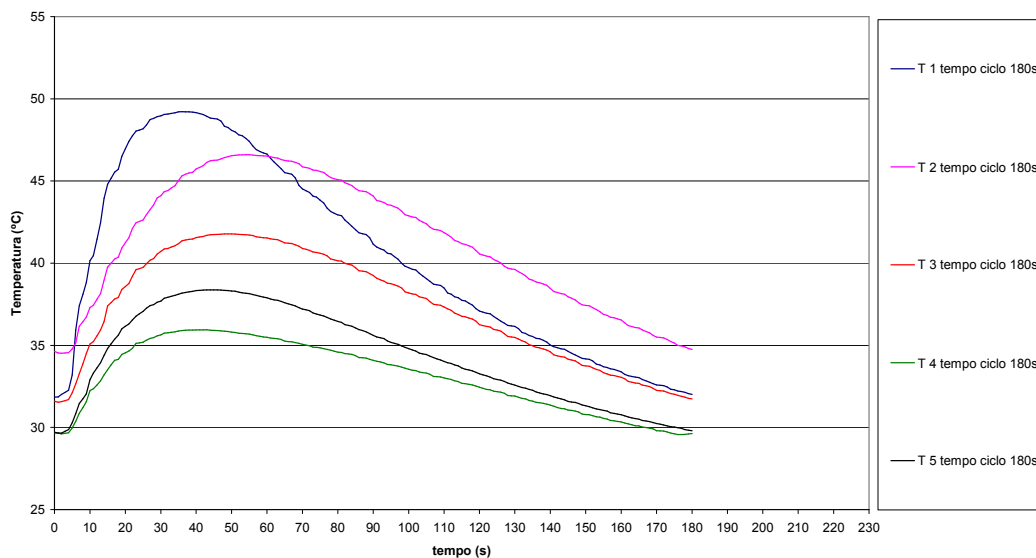


Figura 8.30 – “Engate” PP tempo de ciclo 180s

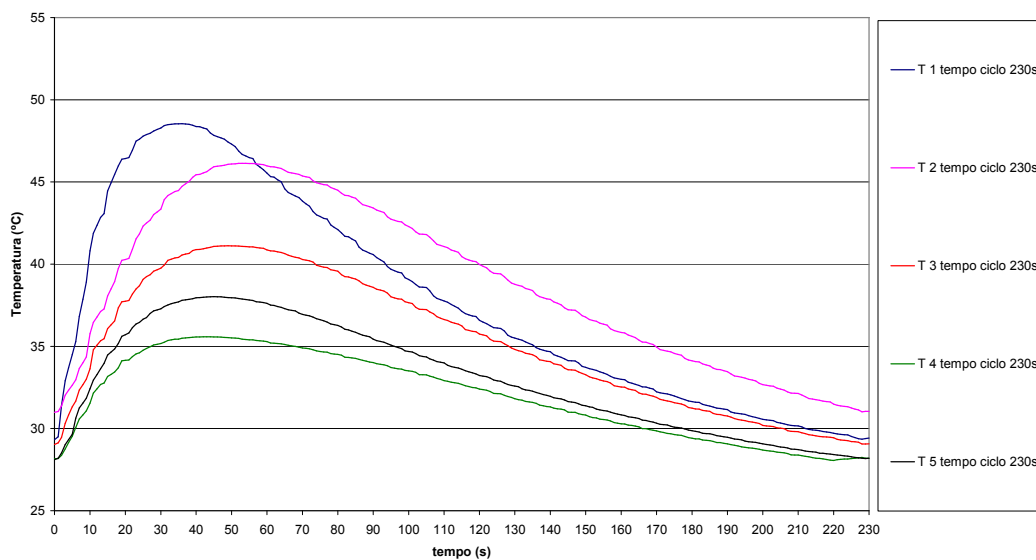


Figura 8.31 – “Engate” PP tempo de ciclo 230s

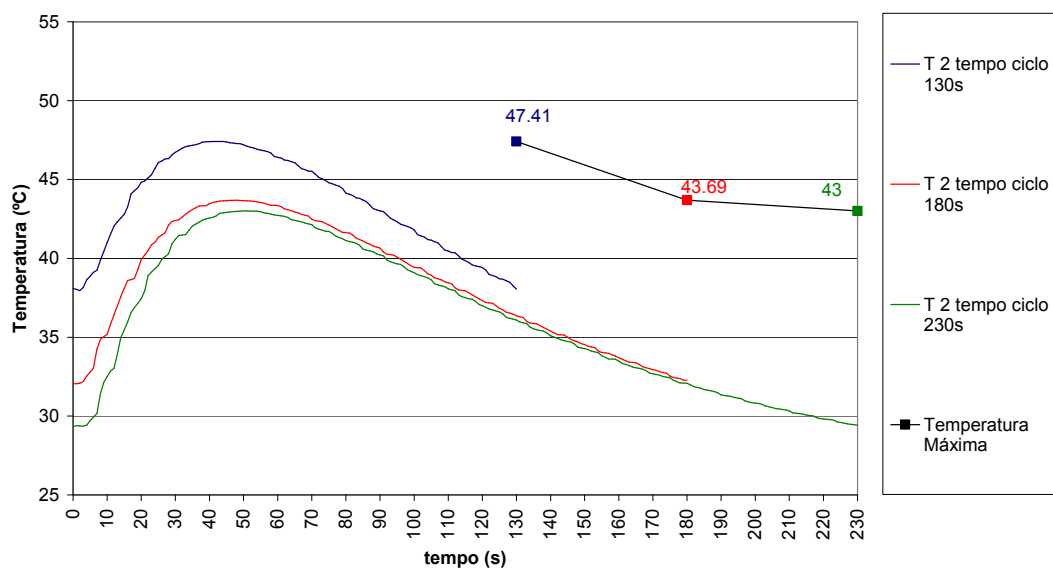


Figura 8.32 – “Engate” temperatura no termopar T2 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

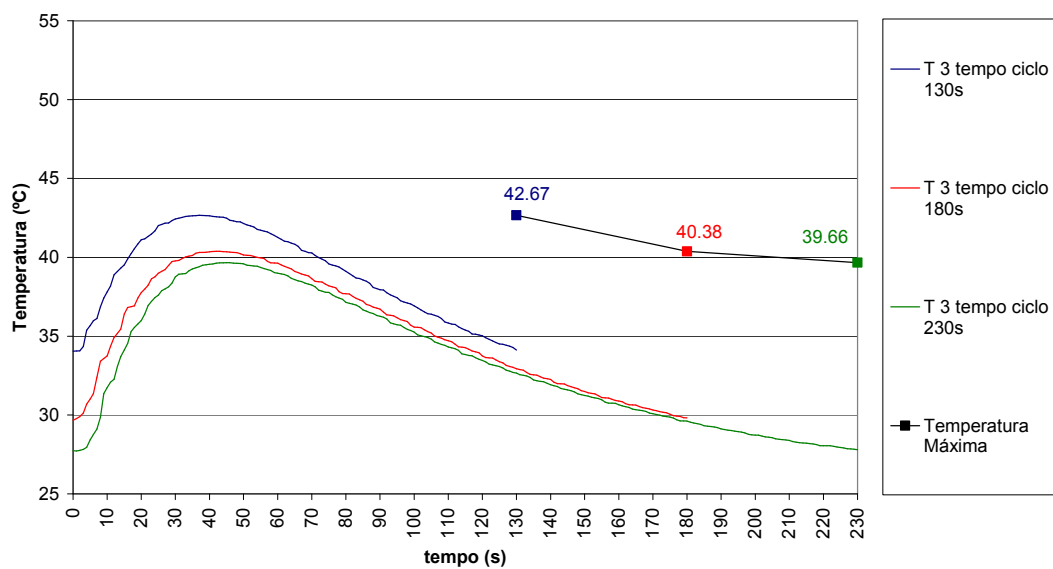


Figura 8.33 – “Engate” temperatura no termopar T3 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

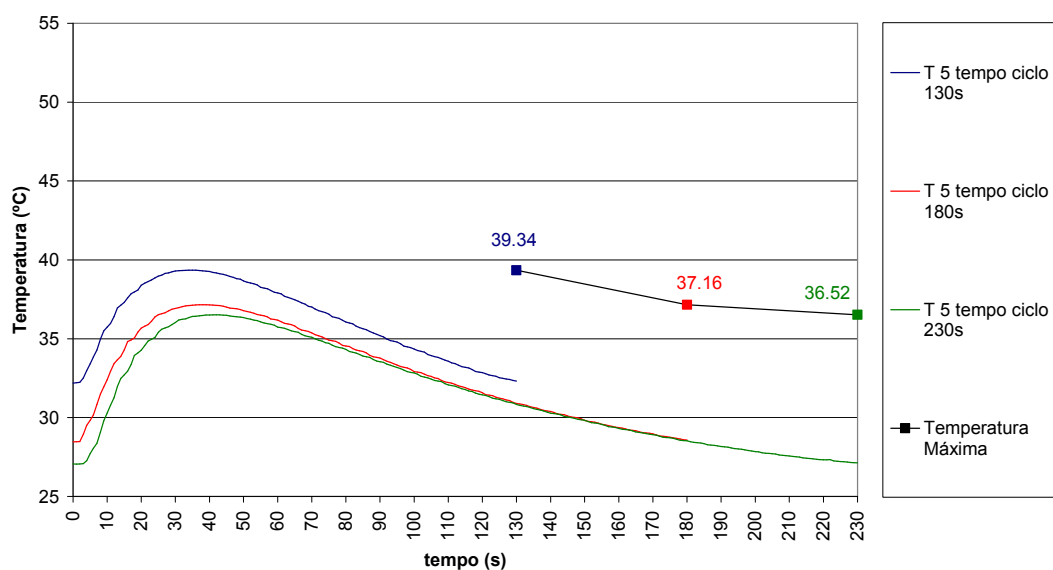


Figura 8.34 – “Engate” temperatura no termopar T5 para injeção PS tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

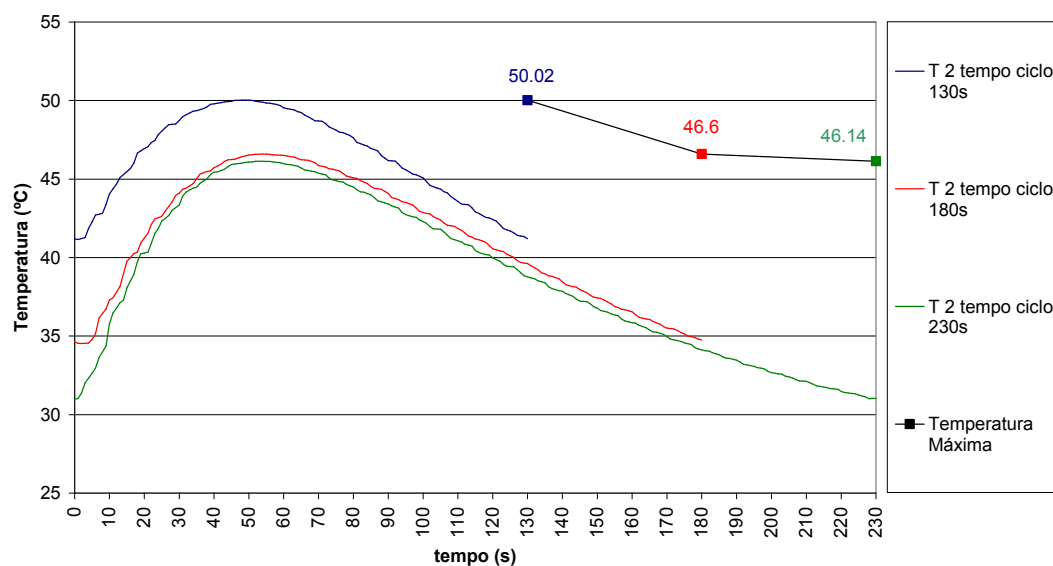


Figura 8.35 – “Engate” temperatura no termopar T2 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

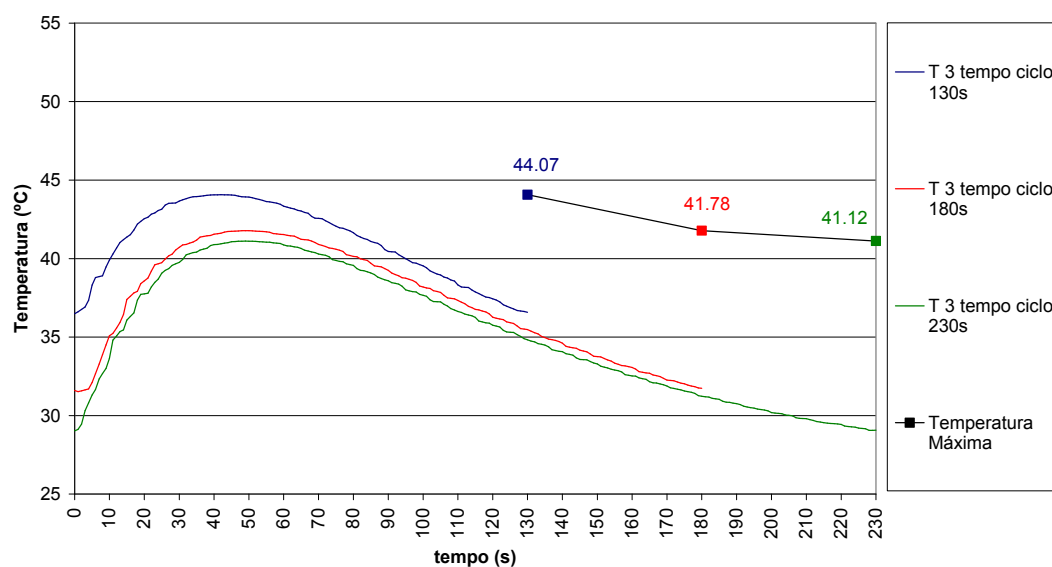


Figura 8.36 – “Engate” temperatura no termopar T3 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

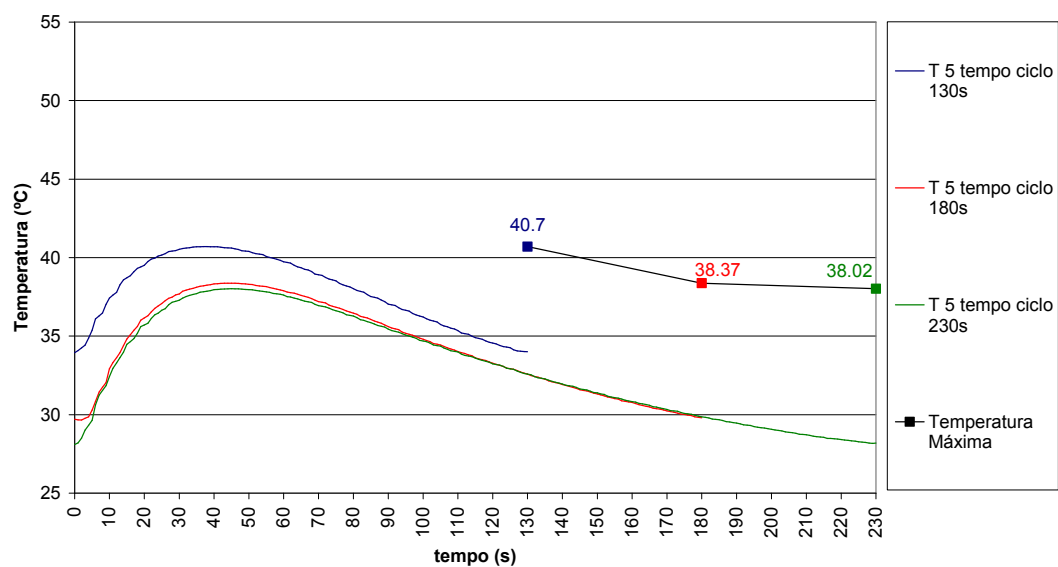


Figura 8.37 – “Engate” temperatura no termopar T5 para injeção PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

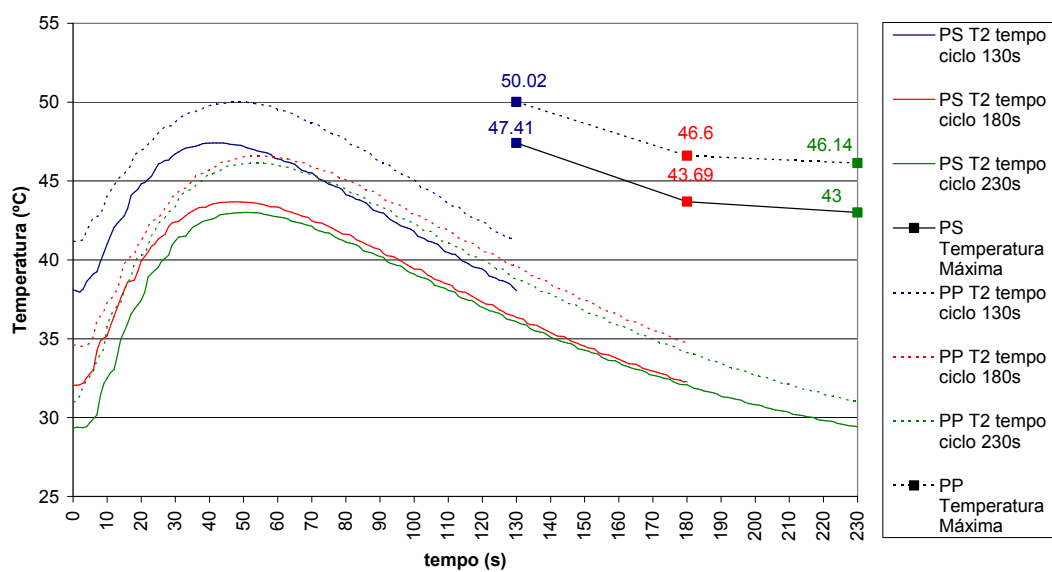


Figura 8.38 – “Engate” temperatura no termopar T2 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

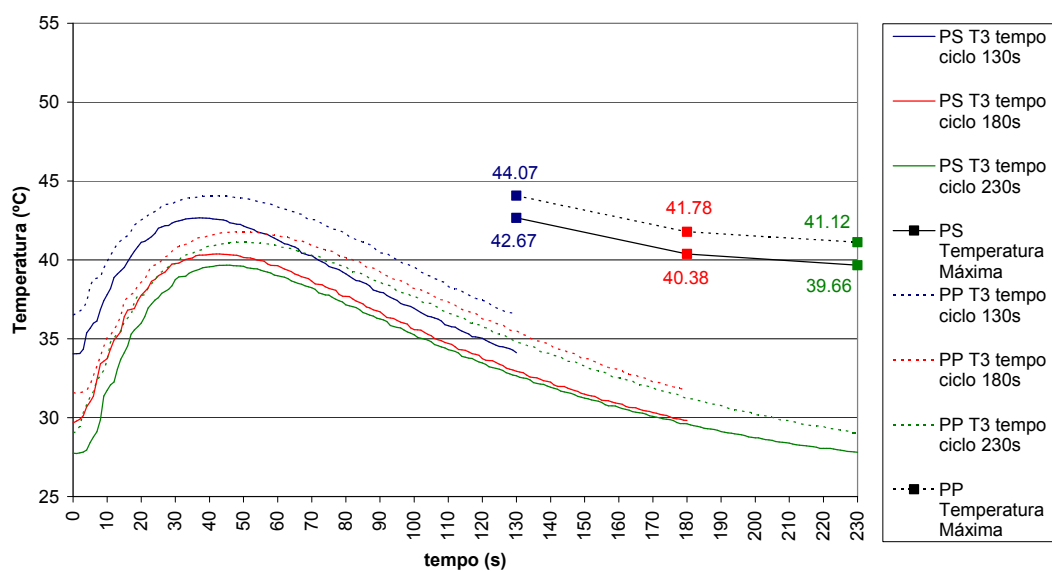


Figura 8.39 – “Engate” temperatura no termopar T3 para injeção de PS e PP para tempos de ciclo de 130, 180 e 230s

Anexo F Comparação experimental / simulação

F.1 “Placa”

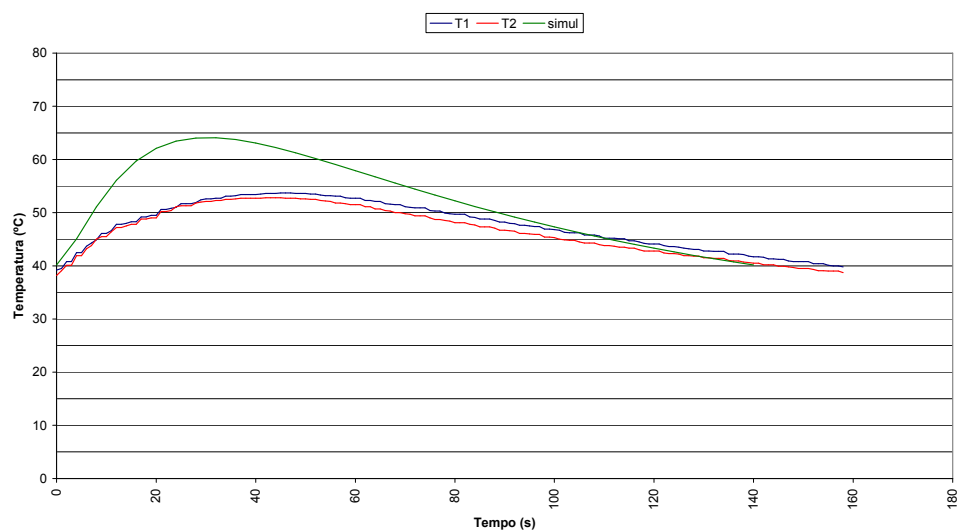


Figura 8.40 – Temperatura de início de ciclo 40°C tempo arref. molde fechado 40s

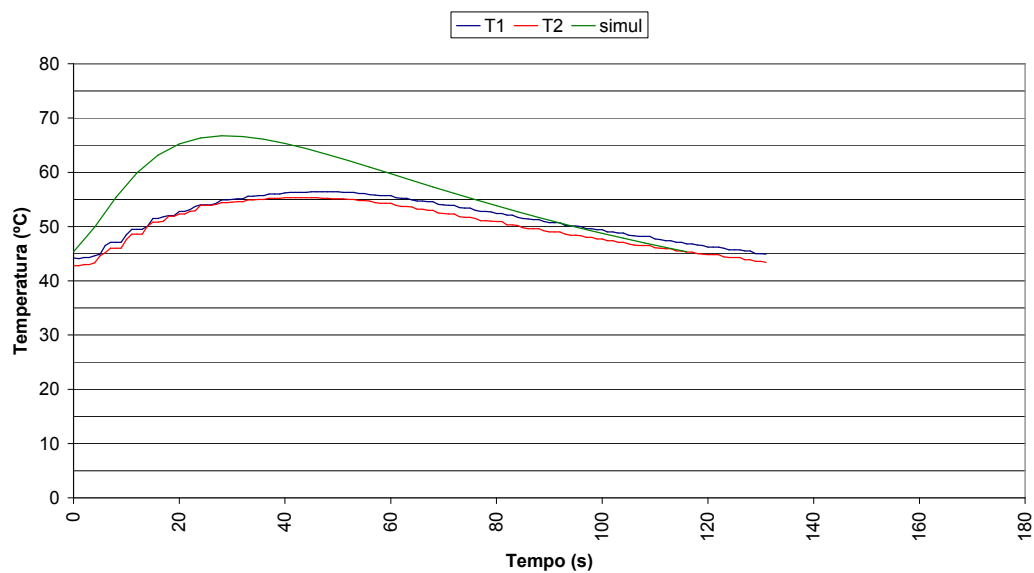


Figura 8.41 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 40s

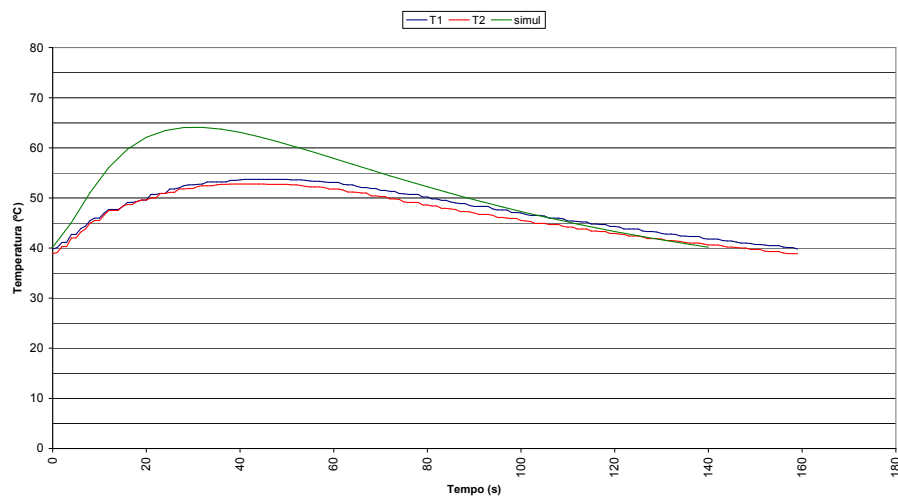


Figura 8.42 – Temperatura de início de ciclo 40°C tempo arref. molde fechado 45s

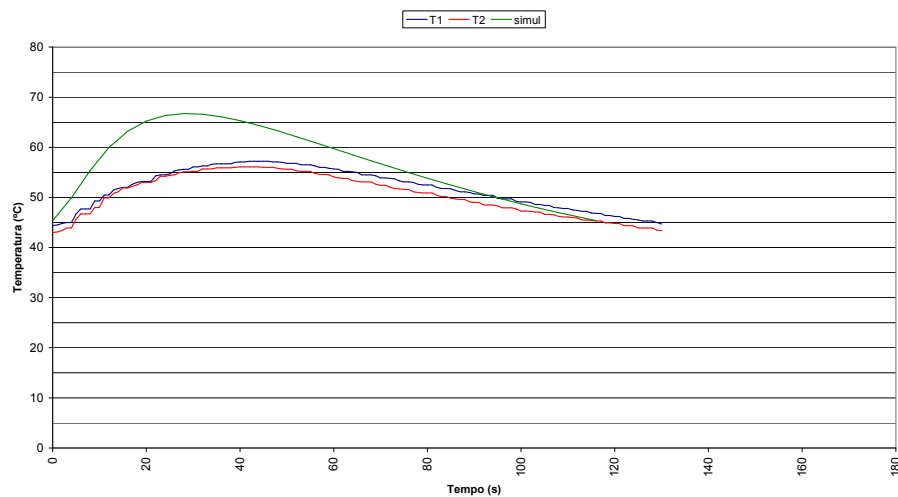


Figura 8.43 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 35s

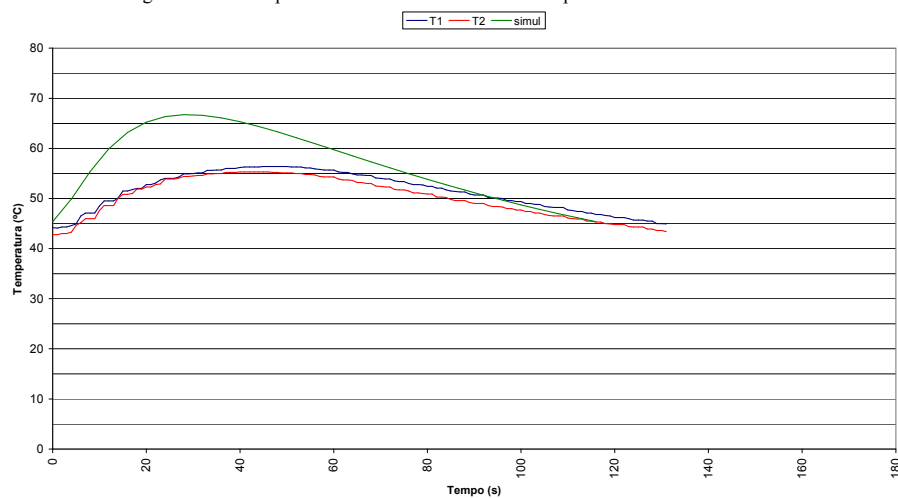


Figura 8.44 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 40s

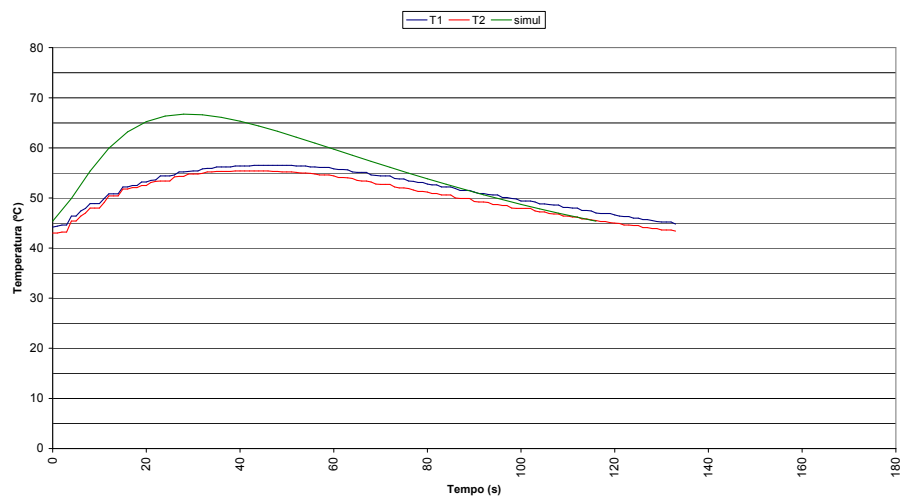


Figura 8.45 – Temperatura de início de ciclo 45°C tempo arref. molde fechado 45s

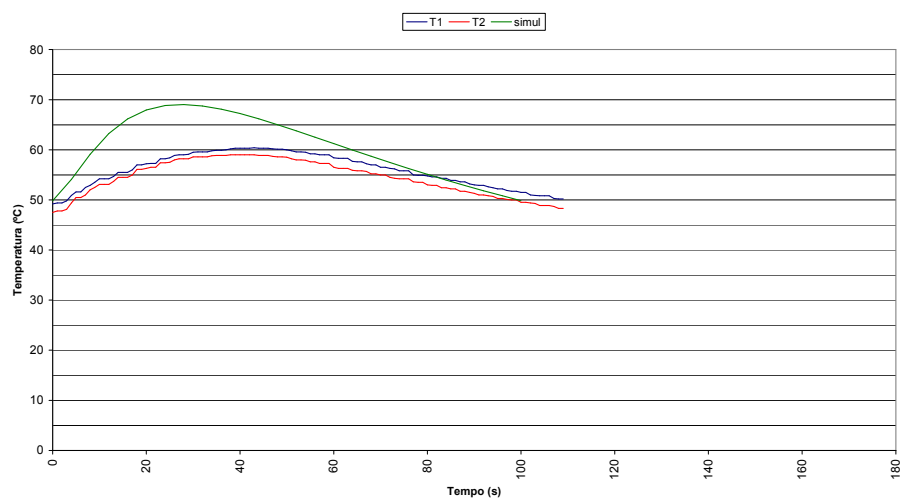


Figura 8.46 – Temperatura de início de ciclo 50°C tempo arref. molde fechado 35s

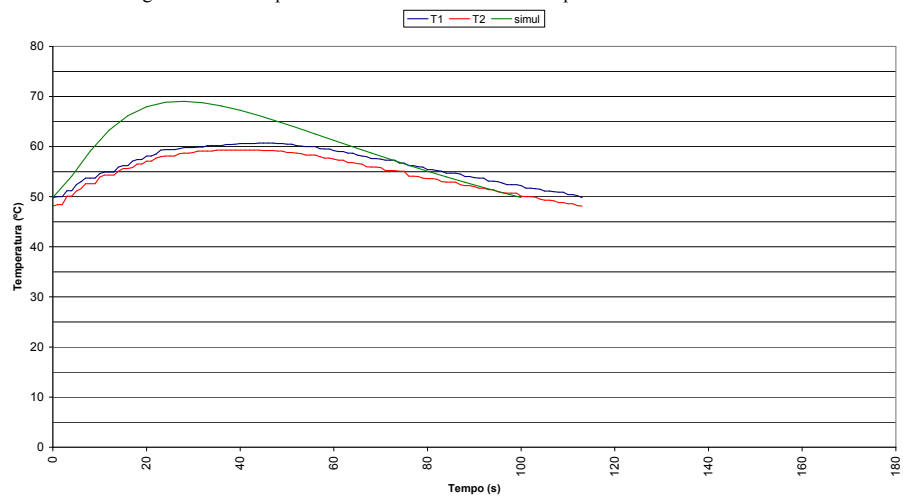


Figura 8.47 – Temperatura de início de ciclo 50°C tempo arref. molde fechado 40s

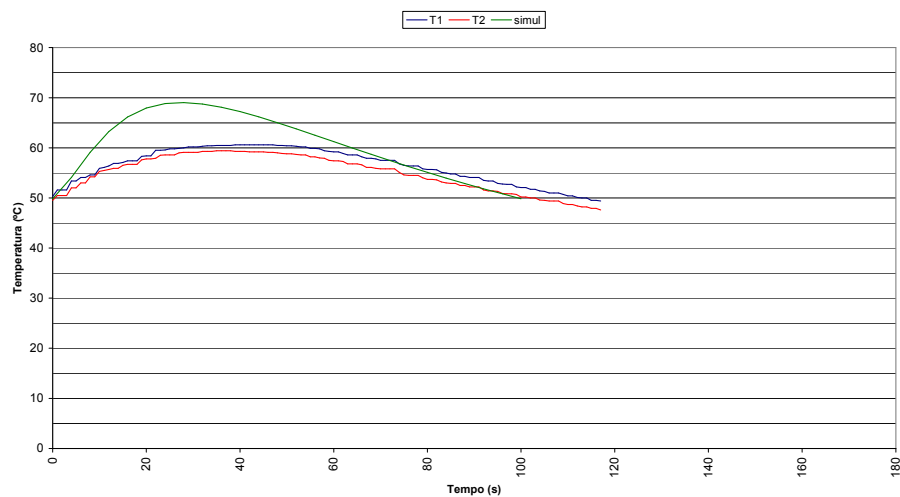


Figura 8.48 – Temperatura de início de ciclo 50°C tempo arref. molde fechado 45s

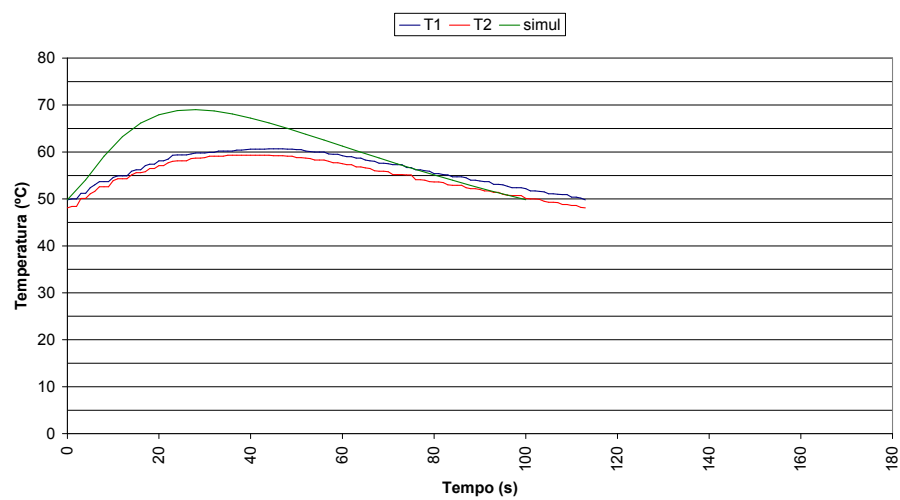


Figura 8.49 – Temperatura de início de ciclo 50°C tempo arref. molde fechado 40s

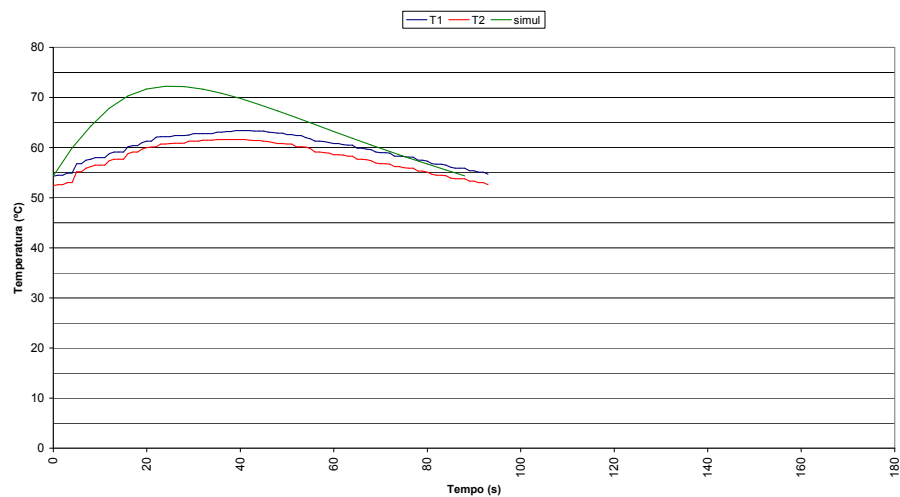


Figura 8.50 – Temperatura de início de ciclo 55°C tempo arref. molde fechado 35s

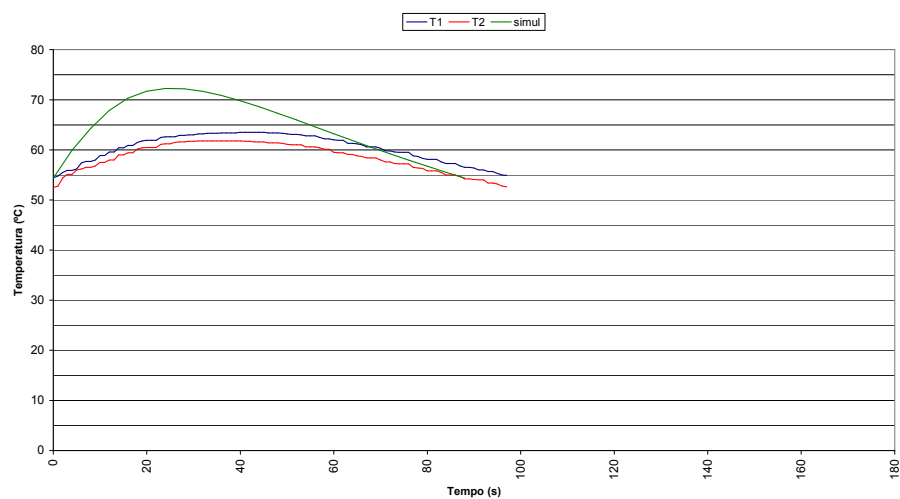


Figura 8.51 – Temperatura de início de ciclo 55°C tempo arref. molde fechado 40s

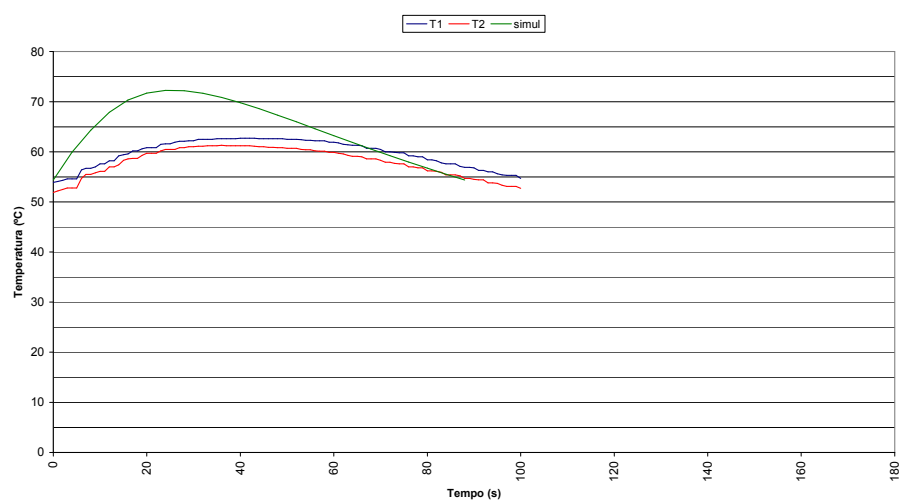


Figura 8.52 – Temperatura de início de ciclo 55°C tempo arref. molde fechado 45s

F.2 “Ficha”

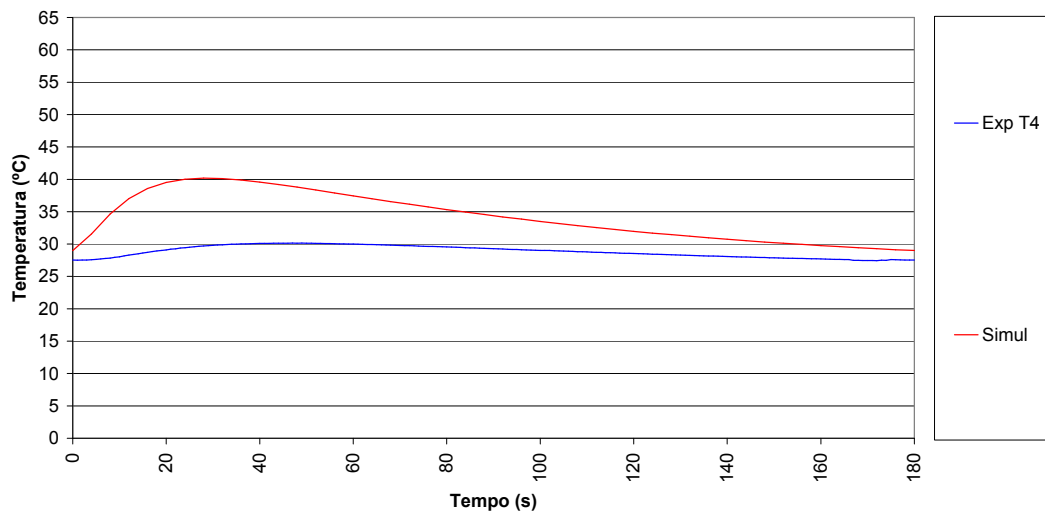


Figura 8.53 – “Ficha” comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 4

F.3 “Engate”

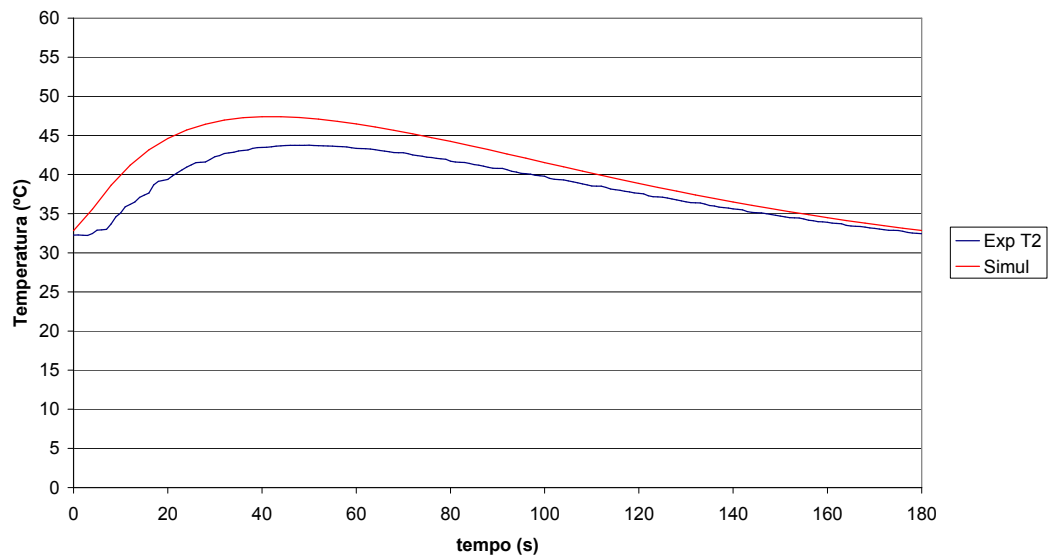


Figura 8.54 – “Engate” PS com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 2

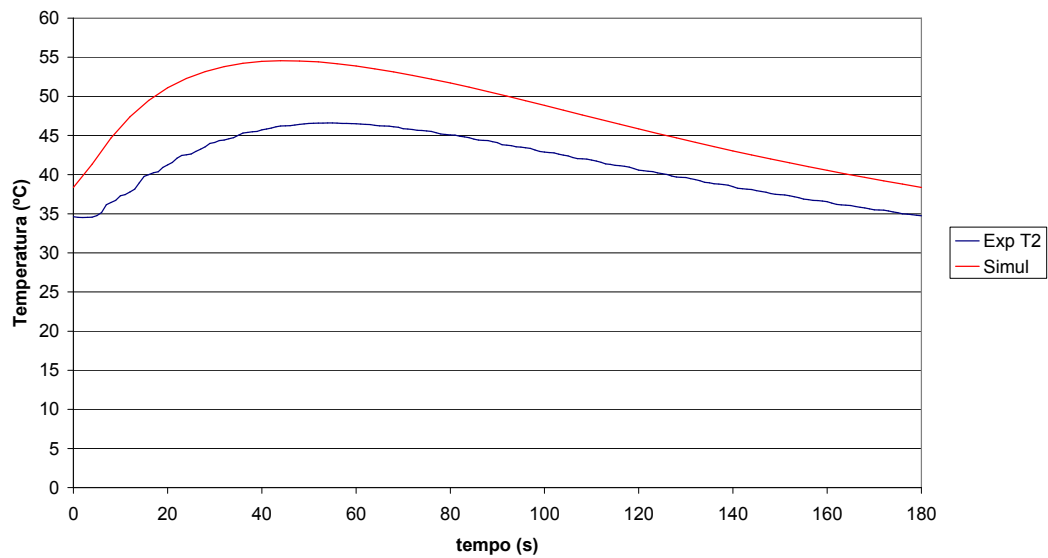


Figura 8.55 – “Engate” PP com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 2

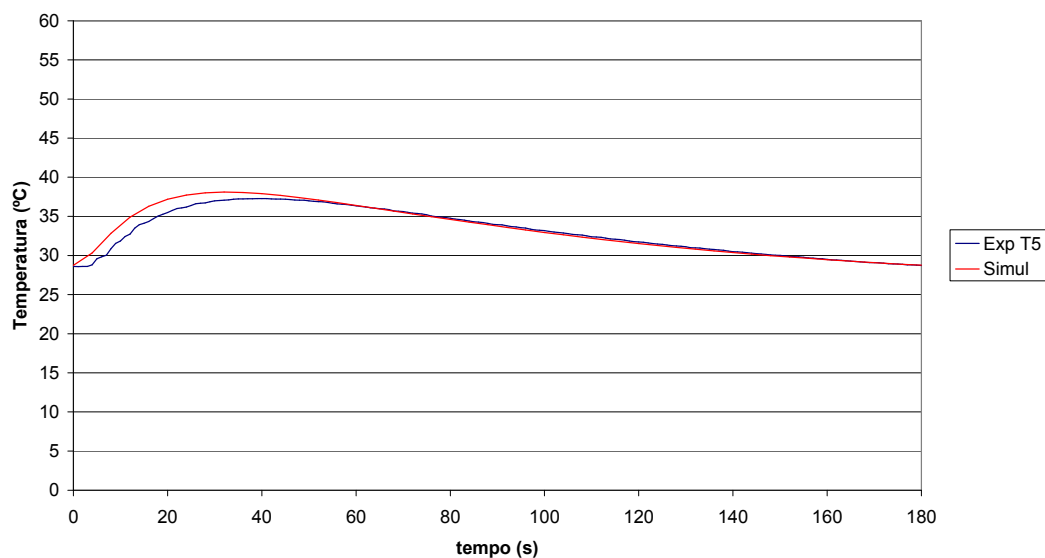


Figura 8.56 – “Engate” PS com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 5

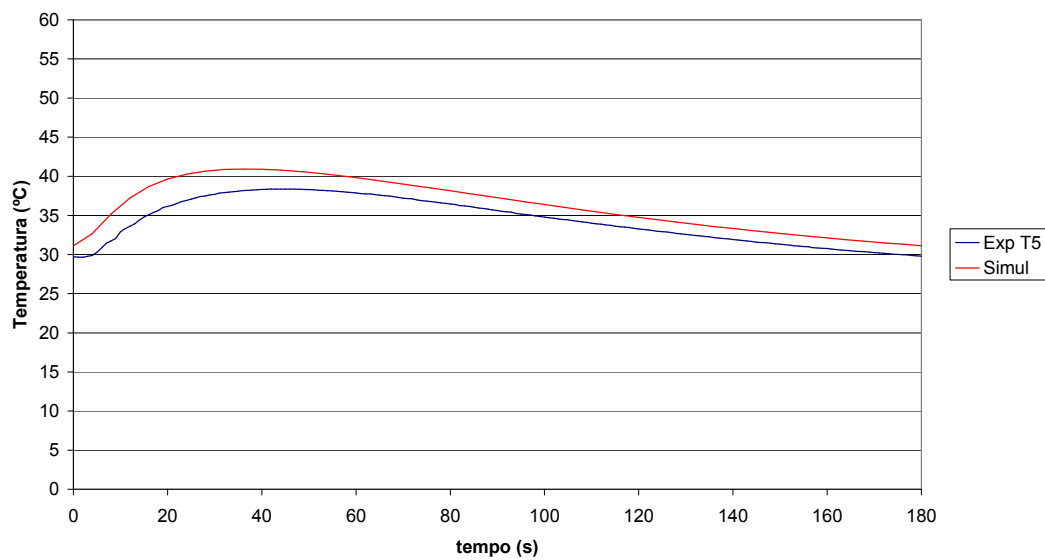


Figura 8.57 – “Engate” PP com cola comparação entre as curvas experimentais e numéricas para um tempo de ciclo de 180s no Termopar 5

Anexo G Desenhos Técnicos